

## 无人机作战网络动态联盟协作模型

杨会杰, 袁仕继, 王烟青  
(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 针对无人机作战网络多任务协作问题, 提出一种基于动态联盟的无人机多任务协作模型。根据无人机网络的连通性和任务优先级, 建立任务协作消息转发机制, 合理控制动态联盟建立规模, 以提高联盟的多任务处理效率。在离散事件系统仿真实论的基础上, 建立了一种基于优先级队列的无人机网络多任务协作仿真模型, 采用时间步长推进方法, 模拟了无人机网络的多任务协作过程。实验结果表明, 与原有的动态联盟多任务协作方法和非协作的多任务处理机制相比, 改进方法能够减少无人机网络的多任务处理时间, 提高无人机作战的多任务处理效率。

**关键词:** 无人机网络; 多任务协作; 动态联盟; 节点度

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)01-0011-05

## A UAV Combat Network Collaboration Model Based on Dynamic Coalition

YANG Hui-jie, YUAN Shi-ji, WANG Yan-qing  
(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** An improved multi-tasking collaboration model based on dynamic coalition was proposed for UAV combat network. According to the UAV network's connectivity and task priorities, a collaboration message forwarding mechanism was established in the model. As the scales of UAV dynamic coalitions were controlled at a reasonable level, the UAV networks could work more efficiently. According to the theory of discrete event system simulation, a UAV network simulation model based on priority queues was established using the time stepping technique, which was used to simulate UAV multitasking collaboration process. Simulation results show that, compared with non-collaborative strategy and the original dynamic coalition model, the proposed model can work effectively with reduced task processing time and improved multitasking operation efficiency.

**Key words:** UAV network; multitasking collaboration; dynamic coalition; node degree

### 0 引言

无人机作战网络由多个分布式、具有自主能力且相互交互的无人机组建而成, 具有智能化、网络化的特点, 是未来军事作战网络的重要组成部分。无人机网络多任务协作<sup>[1-2]</sup>是根据所要完成的任务、无人机的数量以及任务载荷的不同, 合理调度一定数量的无人机进行任务处理, 使得网络化作战的效益最大、代价最小。

近年来, 国内外对无人机作战网络的多任务协

作方法展开了广泛的研究, 主要包括任务分配策略、多机协同算法以及战术环境对任务协作的影响<sup>[3-5]</sup>等。文献[3]研究了不同任务优先级下, 无人机网络的协作策略问题, 其分析认为任务间的距离、无人机的数量和通信时延是影响无人机协作和任务执行效率的主要因素; 文献[6]采用分布协同拍卖的动态任务分配算法, 建立了多无人机任务分配模型, 设计 Agent 拍卖机制实现多机协同目标分配; 文献[7]研究了在冲突避免和有限通信范围约束的条件下, 无人机网络进行目标搜索的协作算法; 动态联盟(dynamic coalition)<sup>[8-9]</sup>作为一种基于事件触发的分布式多任务协作机制, 以捕捉到事件的节点作为联盟的发起者, 选择邻居节点构建联盟, 无需长期维护联盟结构, 对动态环境的适应性相对较好, 适用于无人机作战网络的多任务执行。

收稿日期: 2014-02-12

修回日期: 2014-04-12

基金项目: 中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-11-M07)

作者简介: 杨会杰(1987—), 男, 河南宝丰人, 硕士生, 助工, 研究方向为通信对抗效果评估技术。

但无人机的高速运动和单架无人机有限的通信能力,以及无人机网络的拓扑结构动态变化,会导致局部区域的网络连通性无法适应动态任务需求。

本文以无人机作战网络多任务协作为背景,在采用动态联盟的网络任务协作方式的基础上,提出一种基于协作消息转发的多任务协作网络模型,将任务协作请求与动态联盟机制相结合,提高了协同任务分配机制的可扩展性和动态适应性,从而提升网络的多任务处理效率。

## 1 无人机网络多任务协作模型

### 1.1 单架无人机任务处理模型

将无人机进行任务处理的过程分为任务受理、任务处理和巡航3个阶段。任务受理是指无人机接受任务指令,并向目标移动;任务处理是指无人机到达作战空域进行任务处理;巡航阶段是指无人机处于目标侦察与巡航状态,并等待下一次任务指令。假定通过定位授时设备(如北斗系统)使网络中所有无人机节点保持时钟同步。图1所示为单架无人机进行任务处理的示意图。

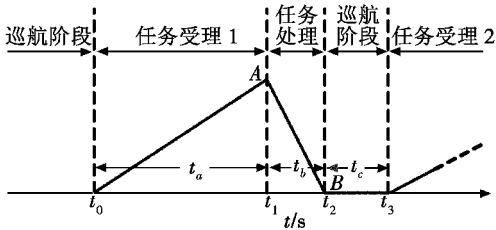


图1 单架无人机任务处理过程示意图

Fig. 1 Task processing stages for single UAV

图中: $t_0$ 为获知目标时刻; $t_1$ 为无人机到达目标位置时刻; $t_2$ 为任务完成时刻; $t_3$ 为获知下一目标时刻; $t_a$ 为任务受理阶段时长; $t_b$ 为任务处理阶段时长; $t_c$ 为无人机巡航阶段;A点的高度为无人机 $u_i$ 完成的任务量 $T^i$ ;线段AB的斜率表示无人机的任务处理速度。

### 1.2 无人机网络动态联盟模型

在无人机网络多任务协作过程中,发现目标的无人机根据目标性质和自身载荷情况,向周围无人机发出任务协作请求,建立动态联盟,并进行任务的协作处理。

用 $\{U, E(t)\}$ 表示整个无人机作战网络, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ,为无人机集合,无人机总数为 $n, n \in \mathbf{N}$ , $E(t) = \{e_1^t, e_2^t, \dots, e_l^t\}$ ,为 $t$ 时刻无人机之间通信链路的集合, $l \in \mathbf{N}$ 。 $t$ 时刻网络中动态联盟的集合为 $C(t) = \{C_1^t, C_2^t, \dots, C_k^t\}, k \in \mathbf{N}$ ,其中, $\forall C_i^t \subseteq C(t), C_i^t = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ix}\}$ ,为动态联盟的成员集合, $x_{C_i^t}$ 为联盟 $C_i^t$ 的成员数量, $x \in \mathbf{N}$ 。于是

$$C(t) \subseteq U \quad (1)$$

且 $\forall u_i \in C_i^t$ ,有

$$u_i \in U \quad (2)$$

定义 $t$ 时刻无人机的状态参数为

$$\delta_i^t = \begin{cases} 0 & u_i \text{ 处于巡航阶段} \\ 1 & u_i \text{ 处于任务受理阶段} \\ 2 & u_i \text{ 处于任务处理阶段} \end{cases} \quad (3)$$

$t$ 时刻无人机网络的状态集合为 $\Delta(t) = \{\delta_1^t, \delta_2^t, \dots, \delta_n^t\}$ 。

图2所示为 $t$ 时刻某无人机网络的动态联盟结构。

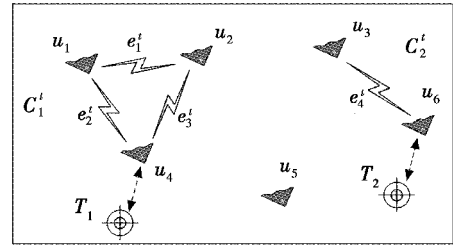


图2  $t$ 时刻无人机网络动态联盟结构示意图

Fig. 2 Dynamic coalitions of UAV network at time  $t$

图中:无人机集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_6\}$ ,表示6架无人机; $E(t) = \{e_1^t, e_2^t, e_3^t, e_4^t\}$ ,表示无人机之间的通信链路。由目标 $T_1$ 和目标 $T_2$ 触发,无人机 $u_4$ 和无人机 $u_6$ 发起联盟建立请求,接收到请求消息的无人机选择加入动态联盟,网络中建立的2个动态联盟分别为 $C_1^t = \{u_1, u_2, u_4\}$ 和 $C_2^t = \{u_3, u_6\}$ ,而无人机 $u_5$ 不在其他无人机通信范围内,未能接收到请求消息,仍处于巡航状态,此时无人机网络的状态集合为 $\Delta(t) = \{1, 1, 1, 1, 0, 1\}$ 。

无人机网络在组建动态联盟时,有如下约束条件。

1) 任意一架无人机只能属于一个动态联盟,即 $\forall C_i^t, C_j^t \subseteq C(t)$ ,且 $i \neq j$ ,有

$$C_i^t \cap C_j^t = \emptyset \quad (4)$$

2) 联盟内成员数量不少于1个,即 $\forall C_i^t \subseteq C(t)$ ,其无人机数量

$$1 \leq x_{C_i^t} \leq n \quad x \in \mathbf{N}, n \in \mathbf{N} \quad (5)$$

3) 每个动态联盟中至少有一架无人机已侦察到目标,以确保每个动态联盟有任务执行,避免网络资源浪费,即 $\forall C_i^t \subseteq C(t)$ ,有

$$\sum_{j=1}^x \delta_j^t > 1 \quad j \in \mathbf{N} \quad (6)$$

### 1.3 多任务协作性能评价

从多任务处理的时间效率方面评价无人机网络的多任务协作性能。设参与任务执行的无人机联盟为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ , $M$ 个目标的任务量(task size)为 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_M\}$ ,单位为1,单架无人机的任务处理速度为 $T_0$ ,单位为s,即一架无人机在单位时间内可处理的任务量为 $T_0$ 。网络多任务协作的效率指标,即无人机网络相对于一架无人机作战时的效率提升倍数为

$$\eta = \frac{\text{总任务量} \div \text{单个无人机处理速度}}{\text{实际处理总时间}} = \frac{\sum_{m=1}^M T_m}{T_0 \cdot \sum_{m=1; C_i \in C}^M \frac{T_m}{C_i}} \quad (7)$$

为使网络多任务处理的效率最高,任务协作模型的目标函数为

$$\max \eta = \frac{\max \sum_{m=1}^M T_m}{T_0 \cdot \sum_{m=1; C_i \in C}^M \frac{T_m}{C_i}} \quad (8)$$

式中:任务  $T_m$  的执行时间为  $T_m/C_i$ ;  $C_i$  为参与执行任务  $T_m$  的动态联盟。

## 2 采用协作消息转发机制的无人机多任务协作模型

在无人机作战网络中,通过邻居无人机节点的消息转发,能够扩大动态联盟的建立规模,适应高优先级任务的处理需求。同时,设置协作消息转发标记,可以在控制联盟规模和网络开销的条件下,提高网络多任务处理效率。

### 2.1 任务协作消息转发机制

本文建立的任务协作消息转发机制是通过在协作请求消息  $req\_msg$  中添加消息转发标记  $msg\_fwd$  来实现,接收到请求消息的无人机根据转发标记判断是否进行该消息的转发。由于无人机组网的规模有限(如几架到十几架),其作战资源十分宝贵,为了避免局部任务处理占用过多的无人机资源,需限制联盟协作请求消息的转发次数。定义转发标记的参数为

$$msg\_fwd = \begin{cases} 0 & \text{不转发该协作请求} \\ 1 & \text{转发该协作请求} \end{cases} \quad (9)$$

转发标记  $msg\_fwd$  由联盟的群首节点进行设置,其设置规则由网络连通性和任务优先级决定。无人机通过定期广播 Hello 消息,感知网络的局部连通性。Hello 消息包括无人机编号  $u_i$  和状态信息  $\delta_i$ 。无人机根据接收到的 Hello 消息,建立邻居节点状态表,统计  $t$  时刻其可连通的邻居节点数,记为  $d_i^t$ (节点度)。采用模糊集方法,将节点度模糊化为 3 个级别,即大(LARGE)、中(MEDIUM)、小(SMALL),表示节点不同的连通能力;将任务优先级模糊化为 3 个级别,即高(HIGH)、中(MEDIUM)、低(LOW),表示不同的任务优先级,且任务量越大优先级越高。采用 IF-THEN 方式,建立协作请求消息转发标记  $msg\_fwd$  的设置规则,如表 1 所示,共包含 9 个规则。表中: $f_N(d_i)$  为群首节点的节点度大小的隶属函数; $f_N(T_i)$  为任务优先级高低的隶属函数。

表 1 协作消息转发标记  $msg\_fwd$  设置规则

Table 1 Rules of collaborative message forwarding flag  $msg\_fwd$

设置规则	IF $f_N(d_i)$	IF $f_N(T_i)$	THEN $msg\_fwd$	设置规则	IF $f_N(d_i)$	IF $f_N(T_i)$	THEN $msg\_fwd$
$R^{(1)}$	小	低	0	$R^{(6)}$	大	中	0
$R^{(2)}$	中	低	0	$R^{(7)}$	小	高	1
$R^{(3)}$	大	低	0	$R^{(8)}$	中	高	1
$R^{(4)}$	小	中	1	$R^{(9)}$	大	高	1
$R^{(5)}$	中	中	1				

### 2.2 无人机协作模型的建立

基于动态联盟和任务协作消息转发机制,建立无人机网络多任务协作模型,其工作流程如图 3 所示。

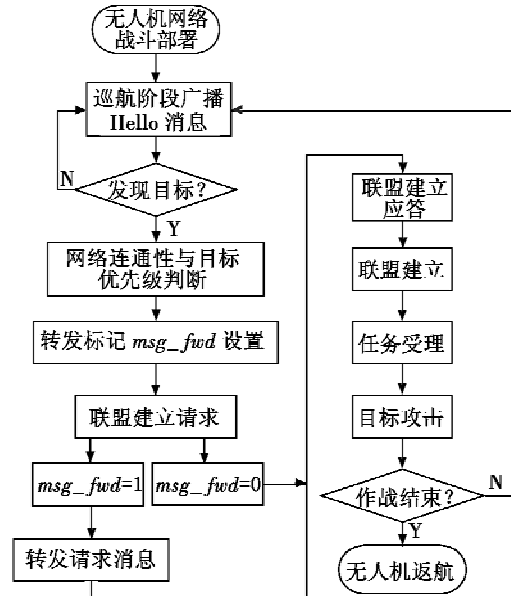


图 3 无人机网络动态联盟任务协作过程

Fig. 3 Task collaboration process of UAV dynamic coalition network

主要步骤如下所述:

- 1) 无人机网络战斗部署;
- 2) 无人机在巡航过程中实施目标侦察;同时,定期广播 Hello 消息,检测与周围节点的连通性,记录并更新其节点度  $d_i$ ;
- 3) 当无人机  $u_i$  侦察到目标时,以自身为群首节点,进行网络连通性与目标任务优先级判断,并根据消息转发设置规则,在请求消息中设置  $msg\_fwd$ ;
- 4) 群首无人机  $u_i$  向周围邻居节点广播任务协作请求消息,接收到协作请求的无人机判断转发标记,如果  $msg\_fwd = 1$ ,则进行一次请求消息的转发,否则,不转发该请求消息,通过在消息数据中记录转发路径,以避免重复转发;
- 5) 接收到请求消息的无人机根据自身状态选择是否加入联盟,并向群首节点发送应答信息;
- 6) 群首无人机  $u_i$  根据应答,选择同意加入联盟的

网络节点建立任务协作动态联盟  $C_i$ ;

7) 已建立的无人机联盟  $C_i$  进行作战任务受理,并向目标位置移动;

8) 到达目标攻击位置的无人机进行任务处理,在任务被某一联盟处理的过程中,仍可以被其他巡航状态的无人机检测到,吸引新的联盟加入该任务处理;

9) 任务处理完毕后,动态联盟解散,如果作战任务结束,无人机返航;否则进入巡航状态,返回 2)。

在目标侦察过程中,可能有多架无人机同时发现目标,其邻居节点可能同时接收到不同群首发送的协同请求,产生节点资源争夺现象。由于该任务管理机制中所有节点类型相同,动态联盟的组织以任务需求为目标,因此,节点的争夺可以通过任务优先级来选择:任务优先级不同时,节点选择加入优先级高的联盟;优先级相同时,节点可以随机选择联盟加入。

### 3 仿真与分析

针对无人机网络多任务协作的仿真问题,设计一种基于优先级队列的离散事件仿真模型,研究动态联盟机制对无人机网络多任务处理效率的影响,并在此基础上分析比较了不同任务协作方式下,无人机网络的多任务处理效率。

#### 3.1 仿真系统设计

无人机网络多任务协作处理的过程在时间和空间上都是离散的<sup>[10]</sup>。根据 2.1 节所述,无人机的工作状态包括巡航、任务受理和任务处理阶段,而任务的状态包括等待处理、接受处理和完成阶段,无人机和任务状态改变的瞬间可以看作事件的发生。采用时间步长推进的仿真时钟,建立无人机网络动态联盟多任务处理仿真模型,如图 4 所示,并在 Matlab 平台上实现。

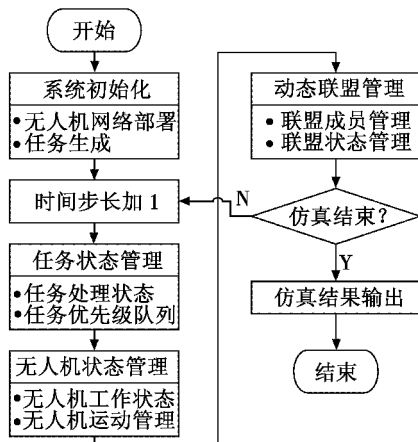


图 4 无人机网络多任务协作仿真模型  
Fig.4 Simulation model of UAV network multitasking collaboration

其主要内容包括系统初始化、任务状态管理、无人

机状态管理和动态联盟管理,以及在时间步长基础上的仿真调度。其中:系统初始化包括无人机网络部署和任务生成;任务状态管理包括任务的处理状态管理和任务队列管理;无人机状态管理包括无人机的工作状态和无人机运动管理;动态联盟管理负责请求消息的转发和应答,以及联盟成员管理和联盟状态管理。

在仿真系统参数设置方面,无人机网络部署方式采用随机分布,运动方式为匀速运动,任务产生过程服从参数为  $\lambda$  的泊松过程,任务优先级分布为随机分布,任务队列采用优先级队列,其服务流程如图 5 所示。

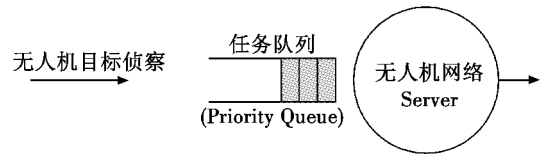


图 5 任务队列服务流程

Fig.5 Service process for task queue

#### 3.2 多任务处理过程仿真

通过实验仿真验证本文模型的有效性,模拟无人机网络对多目标实施协同攻击。设置系统仿真时间步长为 1 s,网络场景的范围为 100 km × 100 km × 5 km,仿真时间 2 h,目标出现次数服从参数  $\lambda = 5$  的泊松过程,即平均每小时任务出现次数为 5 次。设网络中无人机总数为 6,通信范围为 30 km,目标侦察范围为 10 km,巡航状态时无人机移动速度  $v_0 = 30$  km/h,动态联盟时无人机移动速度  $v_1 = 80$  km/h,单架无人机每秒处理任务量为 1。在每个仿真步长结束时,分别记录无人机、任务和动态联盟的状态信息。某次仿真系统初始化过程中,任务生成过程和任务优先级如图 6 所示。

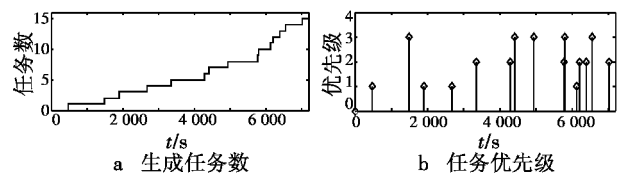


图 6 任务生成过程和优先级

Fig.6 Task generating process and priority value

在仿真执行过程中,任务优先级队列长度变化如图 7 所示,在任务较多时,队列长度较长,最大长度可达 3,平均队列长度为 0.47。

仿真过程中,协作消息转发标记设置如图 8 所示,加入动态联盟的无人机数量变化情况如图 9 所示。

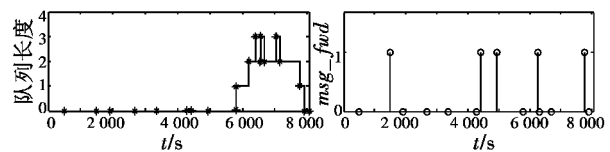


图 7 优先级任务队列长度  
Fig.7 Priority queue length

图 8 协作消息转发标记  
Fig.8 Flag for forwarding collaboration message

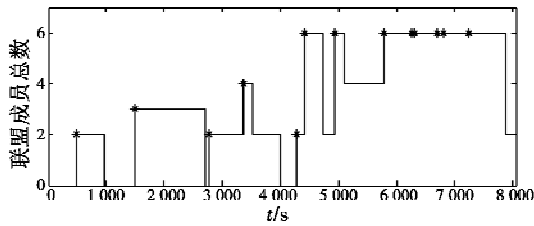


图 9 动态联盟中的无人机数量

Fig. 9 Number of UAVs in dynamic coalitions

多架无人机进行任务协作处理的过程见图 10。

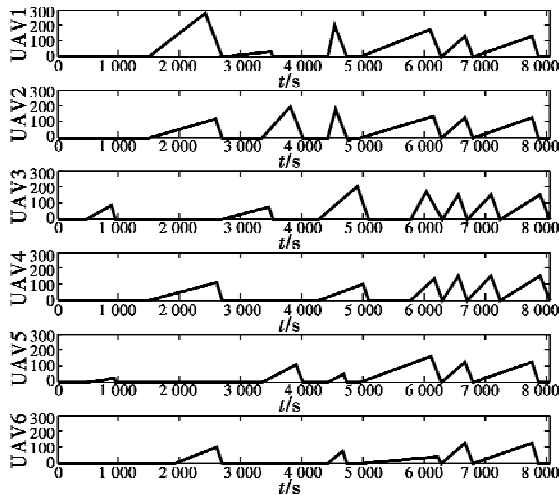


图 10 无人机网络任务协作过程

Fig. 10 Process of multitasking collaboration for UAV network

### 3.3 多任务协作结果分析

针对相同规模和任务分布条件下无人机网络的多任务处理过程,分别采用非协作任务处理方法、无协作消息转发的动态联盟方法和本文提出的方法进行多任务处理,统计任务的执行总时间,如图 11 所示,仿真实验次数为 50 次。可以看出,相对于非协作方法和动态联盟方法,本文方法在总任务处理时间上相对更少。

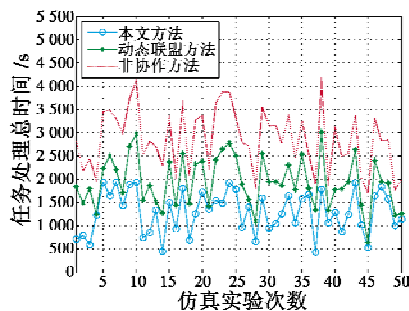


图 11 UAV 网络多任务处理时间对比

Fig. 11 Comparison of multitasking process time for different UAV network models

统计多次仿真中总任务量  $\sum T_i$  与总处理时间  $\sum T_{task}$  的比值,即网络的执行效率  $\eta$ ,如图 12 所示。可以看出,与非任务协作和动态联盟方法相比,本文提出的多任务协作模型能够较好地提高网络的多任务处理

效率。在 50 次仿真实验中,本文方法、动态联盟方法和非协作方法的任务处理效率均值分别为  $\eta_1 = 1.91$ ,  $\eta_2 = 1.67$  和  $\eta_3 = 1.15$ 。相对于动态联盟方法和非协作方法,改进后的多任务处理效率分别提高约 14% 和 66%,证明改进后的动态联盟方法在提高网络多任务协作效率方面是有效的。

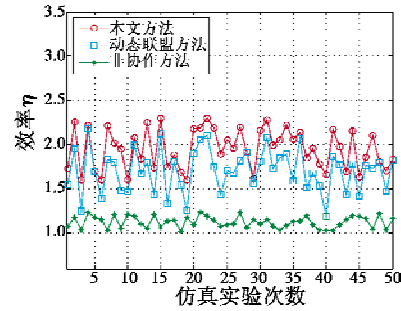


图 12 UAV 网络多任务处理效率对比

Fig. 12 Task process efficiency for different UAV network models

## 4 结论

本文在动态联盟机制的基础上,提出了一种无人机作战网络多任务协作模型。根据任务优先级和节点连通状态合理选择联盟规模,相对于动态联盟机制和非协作任务处理方法,其能够降低多任务的平均处理时间。本文采用时间步长推进的离散事件仿真方法模拟了该模型的任务处理过程,实验结果表明,网络的多任务处理效率有较为明显的提高,同时也验证了该模型的合理性。但在无人机航路规划和多类型无人机协作方面,该模型还考虑不足,有待今后进一步研究完善。

## 参考文献

- [1] SIMI S, KURUP R, RAO S. Distributed task allocation and coordination scheme for a multi-UAV sensor network [C]// IEEE 10th International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2013:1-5.
- [2] FINKE J, PASSINO K M, SPARKS A. Cooperative control via task load balancing for networked uninhabited autonomous vehicles [C]//Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, 2003:31-36.
- [3] GIL A E, PASSINO K M, GANAPATHY S, et al. Cooperative task scheduling for networked uninhabited air vehicles [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(2):561-581.
- [4] ALIGHANBARI M. Task assignment algorithms for teams of UAVs in dynamic environments [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

时估计,因此,滤波效果也并不理想;而 PF-SHF 算法在充分考虑噪声动态变化的情况下,对 PF 的输出值进行二次滤波取得了较好的效果;同时,由于 Sage-Husa 滤波的输入是 PF 的输出,因此最终的滤波精度也在一定程度上受到 PF 初步估计精度的影响。

### 3 结论

针对非线性非高斯条件下的滤波问题,本文提出了一种 PF-SHF 算法,利用改进的 Sage-Husa 估计器在线实时估计系统噪声,同时引入滤波发散判断,提高了滤波精度和算法稳定性。通过对算法计算复杂度的定量分析,比较了几种算法的计算成本,得出了 PF-SHF 并未显著提升计算复杂度的结论。最后通过目标跟踪的仿真实验,比较了 PF, PF-KF 以及 PF-SHF 3 种算法的滤波效果,实验结果验证了算法的有效性。

### 参考文献

- [1] 朱志宇. 粒子滤波算法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2010. (ZHU Z Y. Particle filter and its application [M]. Beijing: Science Press, 2010. )
  - [2] GORDON N J, SALMOND D J, SMITH A F M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation[J]. IEE Proceedings Part F: Radar, Sonar and Navigation, 1993, 140(2):107-113.
  - [3] MO Y W, XIAO D Y. Hybrid system monitoring and diagnosing based on particle filter algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(5):641-648.
  - [4] YU Y H, ZHENG X Y. Particle filter with ant colony optimization for frequency offset estimation in OFDM systems with unknown noise distribution[J]. Signal Processing, 2011, 91(5):1339-1342.
  - [5] 夏楠,邱天爽,李景春,等. 一种卡尔曼滤波与粒子滤波相结合的非线性滤波算法[J]. 电子学报,2013,41(1):148-152. (XIA N, QIU T S, LI J C, et al. A nonlinear filtering algorithm combining the Kalman filter and the particle filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1):148-152. )
  - [6] KOTTECHA J H, DJURIC P M. Gaussian sum particle filtering[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(10):2602-2612.
  - [7] 薛丽,高社生,胡高歌. 自适应 Sage-Husa 粒子滤波及其在组合导航中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(1):84-88. (XUE L, GAO S S, HU G G. Adaptive Sage-Husa particle filtering and its application in integrated navigation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(1):84-88. )
  - [8] SAGE A P, HUSA G W. Adaptive filtering with unknown prior statistics[C]//Proceedings of Joint Automatic Control Conference, Boulder:CO, 1969:760-769.
  - [9] 魏伟,秦永元,张晓冬,等. 对 Sage-Husa 算法的改进[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(6):678-686. (WEI W, QIN Y Y, ZHANG X D, et al. Amelioration of the Sage-Husa algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(6):678-686. )
  - [10] DOUCET A, GODSILL S, ANDRIEU C. On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering[J]. Statistics and Computing, 2000, 10(3):197-208.
  - [11] 石勇,韩崇昭. 自适应 UKF 算法在目标跟踪中的应用[J]. 自动化学报,2011,37(6):755-759. (SHI Y, HAN C Z. Adaptive UKF method with applications to target tracking[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(6):755-759. )
- 
- (上接第15页)
- [5] 刘跃峰,张安. 有人机/无人机编队协同任务分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(3):584-588. (LIU Y F, ZHANG A. Cooperative task assignment method of manned/unmanned aerial vehicle formation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(3):584-588. )
  - [6] 廖沫,陈宗基,周锐. 基于 MAS 的多 UAV 协同任务分配设计与仿真[J]. 系统仿真学报,2007,19(10):2313-2317. (LIAO M, CHEN Z J, ZHOU R. Design and simulation of multi-UAV coordinated task allocation based on MAS [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(10):2313-2317. )
  - [7] BEARD R W, MCLAIN T W. Multiple UAV cooperative search under collision avoidance and limited range communication constraints [C]//Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, 2003:25-30.
  - [8] GEORGE J M, PINTO J, SUJIT P B, et al. Multiple UAV coalition formation strategies [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010:1503-1504.
  - [9] CHEN J, ZANG C, LIANG W, et al. Auction-based dynamic coalition for single target tracking in wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006:94-98.
  - [10] NEHME C E, CRANDALL J W, CUMMINGS M L. Using discrete-event simulation to model situational awareness of unmanned-vehicle operators [C]//Virginia Modeling, Analysis and Simulation Center Capstone Conference, Norfolk, VA, 2008:1-7.