

面向无人机集群的感知与控制闭环调度策略

平雨奇^{1,2}, 丁华昊^{1,2}, 梁天豪^{1,2}, 梁清泉^{1,2}, 王祎珍^{1,2}, 张霆廷^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)广东省空天网络与智能感知重点实验室, 广东 深圳 518000;

2. 哈尔滨工业大学(深圳)信息科学与技术学院, 广东 深圳 518000)

摘要: 在物联网、边缘计算、自主定位导航等技术的推动下, 无人机集群被广泛应用于应急通信、数据收集、环境测绘、智能物流等场景。为了在有限通信资源下实现最优的系统性能, 设计了一种面向无人机集群的远程控制框架。该框架考虑了无人机所处外部环境的差异, 结合状态估计误差和控制误差构建了一个控制指令与调度决策联合优化问题。该问题可以分解为鲁棒控制器设计和更新决策调度两个子问题, 分别通过二次规划与李雅普诺夫优化方法求解。仿真结果验证了先验情境信息、控制误差等因素在无人机集群调度中的重要性。与只考虑状态估计误差的传统策略相比, 新方法可以使跟踪误差最多减小 13.74%, 同时在不同的状态转移噪声时均能展现出更好的性能。

关键词: 无人机集群控制; 移动边缘计算; 资源分配

中图分类号: TP18

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00417

A sensing and control closed-loop scheduling strategy for UAV swarms

PING Yuqi^{1,2}, DING Huahao^{1,2}, LIANG Tianhao^{1,2}, LIANG Qingquan^{1,2}, WANG Yizhen^{1,2}, ZHANG Tingting^{1,2}

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Space-Aerial Networking and Intelligent Sensing, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, China

2. School of Information Science and Technology, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, China

Abstract: Driven by technologies such as the Internet of things (IoT), edge computing, and autonomous positioning and navigation, UAV swarms have been widely applied in scenarios such as emergency communication, data collection, environmental mapping, and intelligent logistics. To achieve optimal system performance under limited communication resources, a remote control framework for UAV swarms was designed. The framework considered the differences in external environments where UAV operate and integrates state estimation errors and control errors to formulate a joint optimization problem for control commands and scheduling decisions. This problem was decomposed into two subproblems: robust controller design and update scheduling, which were solved using quadratic programming and Lyapunov optimization methods, respectively. Simulation results verify the importance of prior contextual information and control errors in UAV swarm scheduling. Compared with traditional strategies that only consider state estimation errors, the new method reduces tracking errors by up to 13.74% and demonstrates better performance under various state transition noise conditions.

Key words: UAV swarms control, mobile edge computing, resource allocation

收稿日期: 2024-09-08; 修回日期: 2024-09-20

通信作者: 张霆廷, zhangtt@hit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62171160); 哈尔滨工业大学原创前沿探索基金项目 (No. HIT.OCEF.2022055); 深圳市重大科技专项 (No. KJZD20231023093055002, No. KJZD20230923114804009); 空天网络与智能感知重点实验室 (No. 2024KSYS023); 深圳市重点实验室项目 (No. ZDSYS2021062309180825)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62171160), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. HIT.OCEF.2022055), The Shenzhen Science and Technology Program (No. KJZD20231023093055002, No. KJZD20230923114804009), The Key Laboratory of Space-Aerial Networking and Intelligent Sensing (No. 2024KSYS023), The Shenzhen Key Laboratory (No. ZDSYS2021062309180825)

0 引言

在物联网、边缘计算、自主定位导航等技术的推动下，无人机（UAV, unmanned aerial vehicle）作为低空经济的核心平台，被广泛应用在应急通信^[1-3]、辅助定位^[4-6]、自动巡检^[7-9]、智能物流^[10]等场景。然而，由于有效载荷能力、计算能力、感知范围、覆盖范围等方面的限制，单无人机可能无法满足复杂应用的需求^[11]。因此，无人机集群控制技术日益受到关注，该技术旨在克服上述局限性，从而进一步扩展其应用范围。

其中，如何利用有限的无线资源实现无人机可靠的状态监测与控制至关重要^[12]。作为无线网络控制系统（WNCS, wireless networked control system）的典型应用，无人机集群控制需要传感器、控制器和执行器之间的相互协作。传感器监测无人机状态信息，通过上行链路发送给控制器，控制器处理接收到的状态信息，并生成控制指令，再通过下行链路将指令发送给执行器，感知、通信、计算和控制形成一个闭环。在一般的WNCS中，通信性能与控制性能往往是相互耦合的，系统的通信需求与控制任务紧密相关^[13]，但对于无人机控制系统而言，通信的缺陷会严重影响控制性能，使得状态信息或控制指令更新不及时，可能导致无人机偏离规划的轨迹^[14]。因此，在设计系统时，需要考虑系统状态和控制指令的更新频率，以保证这些信息的时效性可以满足系统的需求。基于此，研究者将数据包自生成起所经过的时间定义为信息年龄（AoI, age of information），用以评估信息的时效性^[15]。

近年来，借助AoI来分析WNCS中控制性能与通信性能的关系备受关注^[16-25]。文献[17]研究了维纳过程中状态估计的均方误差与AoI的关系，并证明了在维纳过程中最小化AoI等价于最小化状态估计的均方误差。一般来说，AoI越小代表信息越新鲜，时效性越好的信息往往可以帮助系统实现更好的性能。然而，AoI是随时间线性增长的，这一特性在实际系统中可能不能很好地反映系统对状态更新的紧迫程度。因此，学者们进一步构建了AoI的函数作为新的评价指标，以反映不同信息在时效性下降速率上的差异^[18-21]。这些指标虽然在一定程度上反映了系统中各种信息更新的不同需求，但它们仍然只与信息产生的时间有关，而没有考虑系统的

实际状态对更新产生的影响。同步年龄^[22]（AoS, age of synchronization）与错误信息年龄^[23]（AoII, age of incorrect information）则考虑了系统状态误差的大小会对信息更新产生不同的需求。其中，AoS表示接收端的状态与被监测的实际状态从不同步开始经历的时间；AoII表示从信息发生错误开始至信息更新经历的时间。由于AoS与AoII考虑了系统的实际状态，因此，对处于不同状态的系统可以实现不同频率的更新。由于WNCS系统是一个闭环系统，系统的上行链路和下行链路的信息更新频率都会影响系统的最终性能，文献[24]同时考虑了上下行链路的AoI，并定义了一种新的指标——环路年龄（AoL, age of loop），以实现更加准确的上下行估计。为了更好地表征信息的时效性与控制任务所属情境信息和系统性能的关系，文献[25]提出了信息紧迫性（UoI, urgency of information），以实现动态情境下信息的自适应更新调度。在此基础上，文献[26-29]对车联网场景的情境感知调度进行了深入研究，为探讨外部情境与系统调度之间的关系奠定了基础。

在集群轨迹跟踪控制问题中，无人机潜在的控制、感知、定位的误差，致使其偏离规划的轨迹。受限于无线通信资源与能源等因素，无人机也需要以合适的频率与远程控制节点交互信息^[27]。与此同时，飞行所处的空域管制规则、环境中障碍物密度等外部情境信息上的差异，也会对无人机状态与控制指令的更新频率提出不同的需求。现有的评价指标和调度框架不能很好地适应上述集群控制中的需求。为了应对这些挑战，本文开展了对情境感知的无人机集群控制框架和信息更新调度策略的研究，旨在实现高效、灵活的自适应无人机集群控制。本文的主要贡献如下。

1) 基于对无人机集群控制需求的分析，本文构建了一个无线通信资源受限条件下的无人机集群远程控制框架。该框架考虑了远程控制节点在每个时隙只能与有限数量的无人机进行信息交互，信息交互的过程包括无人机状态的上传和控制指令的下发。

2) 基于上述框架，本文考虑无人机所处外部情境信息的差异，并结合状态估计误差和控制误差，提出了一种无人机状态与控制指令更新调度指标，基于该指标构建了一个控制指令与调度决策联合优

化问题。该问题可以分解为鲁棒控制器设计和更新决策调度问题，并通过二次规划与李雅普诺夫优化方法求解。

3) 本文通过仿真实验验证了所提方法的有效性。实验结果表明，集群控制框架和调度策略除了可以实现有限通信资源下的自适应调度，与只考虑状态估计误差的策略相比，在不同无人机数目下，还可以最多减小13.74%的跟踪误差，在不同的状态转移噪声下，可以使跟踪误差平均减小8.36%。

1 系统模型与问题描述

本文研究了无人机集群的远程控制以及无人机状态、控制指令更新调度问题，集中式无人机控制调度场景如图1所示。节点数目为 N 的无人机集群在远程控制节点的控制及调度下，实现无人机状态监测和鲁棒轨迹跟踪。

在大规模无人机集群中，受限於无线通信资源和能源等因素，无人机无法在每一个时隙向远程控制节点上传状态信息，同时接收更新的控制指令序列。随着时间的推移，远程控制节点对于无人机状态估计的不确定性不断增大，无人机控制的稳定性也将难以保证。因此，需要可靠的调度策略和控制器设计来完成无人机状态和控制指令的更新，以实现无人机集群的最优性能。

本文构建了一个通信资源受限的集中式无人机集群远程控制框架，集中式无人机控制调度系统架构如图2所示。在每个时隙中，受限於无线通信资源，远程控制节点最多可以支持 K 台无人机进行双向通信，实现信息交互。信息交互的过程包括无人机通过上行链路向远程控制节点更新状态信息，远

程控制节点根据状态信息和无人机参考轨迹计算最优的控制指令序列，并通过下行链路将其发送给无人机。信息交互是远程控制节点实现无人机状态监测和鲁棒控制的基础，因此，决策信息交互的对象至关重要。

使用 $\mathbf{D}(t) = [D_1(t), \dots, D_i(t), \dots, D_N(t)]^T$ 表示系统在 t 时刻的信息交互的决策变量，其中 $D_i(t) \in \{0, 1\}$ 表示无人机 i 的决策结果， $D_i(t) = 1$ 表示远程控制节点与无人机 i 进行信息交互， $D_i(t) = 0$ 表示远程控制节点让无人机 i 在 t 时刻保持空闲。

1.1 无人机运动模型

为不失一般性，本文使用二阶运动学模型来描述无人机的运动，即控制器可以通过改变无人机的加速度来控制无人机。无人机 i 在 t 时刻的离散时间线性化控制模型为

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}_i(t) + \mathbf{w}_i \quad (1)$$

其中， $\mathbf{x}_i(t) = [p_{x,i}(t), p_{y,i}(t), p_{z,i}(t), v_{x,i}(t), v_{y,i}(t), v_{z,i}(t)]^T$ 表示无人机 i 在 t 时刻真实的三维位置和速度， $\mathbf{u}_i(t) = [a_{x,i}(t), a_{y,i}(t), a_{z,i}(t)]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 表示无人机的加速度输入， $\mathbf{w}_i \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}_{6 \times 1}, \mathbf{R})$ 表示无人机的状态转移噪声， $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} = \mathbf{A}_1 \otimes \mathbf{I}_{3 \times 3}$ 和 $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{6 \times 3} = \mathbf{B}_1 \otimes \mathbf{I}_{3 \times 3}$ ，分别表示状态转移矩阵和控制矩阵， \otimes 表示克罗内克积， \mathbf{A}_1 与 \mathbf{B}_1 可以表示为

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} T_s^2 \\ T_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中， T_s 表示采样间隔。

1.2 无人机状态的感知和估计

为不失一般性，本文认为无人机可以通过全球导航卫星系统 (GNSS, global navigation satellite

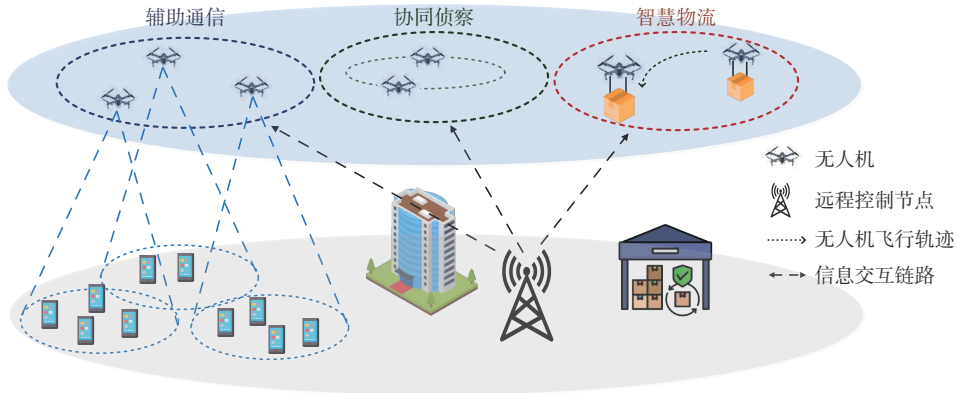


图1 集中式无人机控制调度场景

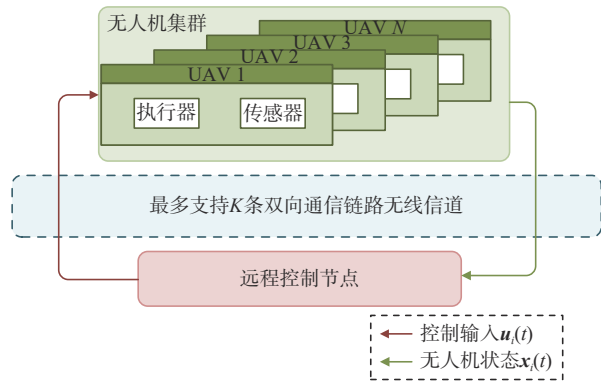


图2 集中式无人机控制调度系统架构

system)、惯性测量单元 (IMU, inertial measurement unit) 等传感器获取真实的状态信息 $\mathbf{x}_i(t)$ 。但是，由于通信资源的限制，无法在每个时隙都将这些状态信息上传到远程控制节点。因此，远程控制节点需要使用上次更新的状态以及控制输入获取无人机的状态估计 $\hat{\mathbf{x}}_i(t)$ 。考虑无人机的运动模型是线性的，且状态转移噪声是高斯分布的，可以使用最优状态估计方法获取无人机的状态估计^[30]。结合式(1)，状态估计的更新可以表示为

$$\hat{\mathbf{x}}_i(t) = \begin{cases} \mathbf{x}_i(t), & D_i(t) = 1 \\ \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_i(t-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}_i(t-1), & D_i(t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

状态估计误差 $\mathbf{Q}_i(t)$ 可以表示为

$$\mathbf{Q}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) - \hat{\mathbf{x}}_i(t) \quad (4)$$

结合式(1)和式(3)，状态估计误差的更新可以表示为

$$\mathbf{Q}_i(t) = \begin{cases} 0, & D_i(t) = 1 \\ \mathbf{A}\mathbf{Q}_i(t-1) + \mathbf{w}_i, & D_i(t) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

不难发现，无人机 i 的状态估计误差 $\mathbf{Q}_i(t)$ 在其不被调度时是方差随时间增长的服从零均值高斯分布的随机变量。

1.3 情境信息的无人机集群控制

在集群轨迹跟踪控制问题中，无人机处于轨迹中不同的位置，可能会对状态与控制指令的更新频率提出不同的需求。在控制性能要求更高、情况更紧急、控制难度更大的场景下需要更频繁的信息交互。因此，调度系统在设计时应该同时考虑无人机所处的外部情境信息、状态以及控制目标等因素。本文参考文献[25]中对于 UoI 的定义，给出了无人机 i 性能的度量指标

$$F_i(t) = \omega_i(t) \delta(\mathbf{e}_i(t)) \quad (6)$$

其中， $\omega_i(t)$ 为无人机 i 在 t 时刻的情境权重，情境

权重表示无人机在不同环境及不同应用下对性能的敏感程度，情境权重越大，敏感程度越高^[27]。以巡航任务为例，当飞行经过人口密集区域或者障碍物密集区域时，无人机应该更加高频地向远程控制中心上传状态信息，并且对偏离预定轨迹的容忍程度更低。当飞行在空旷且安全的区域时，无人机的状态监测和控制可以适当放松，将有限的通信资源分配给集群中其他的无人机。式(6)中， $\delta(\cdot)$ 是一个误差损失函数，可以根据不同系统使用不同的形式，如绝对误差、二次函数误差、指数误差等。不同于文献[25]中使用远程控制器的估计误差构建函数，本文进一步考虑远程控制系统是一个闭环系统，调度除了需要保证远程估计误差尽可能小，还需要实现更好的控制性能。因此，式(6)中 $\mathbf{e}_i(t)$ 定义为无人机 i 的实际轨迹跟踪控制误差，即

$$\mathbf{e}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_i^d(t) \quad (7)$$

其中， $\mathbf{x}_i^d(t) = [p_{x,i}^d(t), p_{y,i}^d(t), p_{z,i}^d(t), v_{x,i}^d(t), v_{y,i}^d(t), v_{z,i}^d(t)]^T$ 是远程控制节点根据任务给无人机 i 规划的参考轨迹。结合式(4)，实际轨迹跟踪控制误差可以表示为

$$\mathbf{e}_i(t) = \hat{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{x}_i^d(t) + \mathbf{Q}_i(t) \quad (8)$$

在无人机集群轨迹跟踪控制问题中，考虑可微性、对大误差的敏感性与惩罚机制以及优化控制理论中的应用便利性与可扩展性等因素，本文选取加权二次函数作为误差损失函数，即

$$\delta(\mathbf{e}_i(t)) = \mathbf{e}_i^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}_i(t) \quad (9)$$

其中， \mathbf{P} 是一个表示位置与速度误差权重的正定矩阵。

设计的目标是在中心节点构建最优调度策略，决策出需要信息交互的无人机，以便在有限的通信资源下，实现最佳的系统性能。指定 t 为当前的时刻，考虑无人机在未来 ΔT 时隙的预测步长内实现最优性能，构建以下优化问题

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \min_{\mathbf{D}(t), \mathbf{u}_i(t)} \limsup_{\Delta T \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} F_i(k) \right] \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \sum_{i=1}^N D_i(t) \leq K, \forall t \\ & \text{C2: } D_i(t) \in \{0, 1\}, \forall i, t \end{aligned} \quad (10)$$

其中，C1 是对每个时隙远程控制节点最大数据交互能力的约束，C2 是远程控制节点调度决策变量的约束。

不难发现，当情境权重在每一个时刻对于所有

无人机的取值相同时，式(10)中的问题转化为构建一个信息交互调度策略，使所有无人机的平均二次加权轨迹跟踪均方误差最小。

2 最优控制调度策略设计

本节通过对式(10)中优化问题P1的分析，将该问题分解为鲁棒控制器设计和信息交互决策调度两个子问题，并设计了最优控制器来计算无人机的控制指令，将信息交互调度问题转化为李雅普诺夫优化问题，并给出实时调度策略。

2.1 问题分解

基于式(8)、式(10)，优化目标可以被表示为

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} F_i(k) \right] = \\ & \sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} \omega_i(k) (\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{x}_i^d(k))^T \mathbf{P} (\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{x}_i^d(k)) \right] = \\ & \underbrace{\sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} \omega_i(k) (\hat{\mathbf{x}}_i(k) - \mathbf{x}_i^d(k))^T \mathbf{P} (\hat{\mathbf{x}}_i(k) - \mathbf{x}_i^d(k)) \right]}_{\text{控制误差}} + \\ & \underbrace{\sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} \omega_i(k) \mathbf{Q}_i^T(k) \mathbf{P} \mathbf{Q}_i(k) \right]}_{\text{状态估计误差}} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)的结果可以分为控制误差项和状态估计误差项。控制误差项与无人机状态的估计和期望轨迹有关。联合式(3)可知，控制误差项的大小在期望轨迹 \mathbf{x}_i^d 、无人机当前时刻的状态估计确定时，仅与控制指令 $\mathbf{u}_i(t)$ 有关。远程控制节点使用无人机通过上行链路传输的状态可以计算出更加准确的控制指令。状态估计误差项表示由无人机状态估计噪声随时间累计导致的系统性能的下限值。由式(5)可知，该项的大小仅与无人机上一次传输状态信息的时间有关，即仅与信息交换的间隔有关。

在信息交互的过程中，无人机向远程控制节点上传状态信息，这一行为将从上行链路与下行链路两个角度影响系统性能，而远程控制节点更新准确的控制指令有助于无人机应对更复杂的动态控制目标。观察式(11)中的状态估计误差项不难发现，它与文献[25]中UoI的定义一致，提出的指标是在考虑控制误差时，对UoI的扩展。

考虑系统要在有限长时隙内实现平均最优性能，优化问题P1可以表示为

$$\begin{aligned} \text{P2: } & \min_{\mathbf{D}(t), \mathbf{u}_i(t)} \left[\sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} \omega_i(k) (\hat{\mathbf{x}}_i(k) - \mathbf{x}_i^d(k))^T \mathbf{P} (\hat{\mathbf{x}}_i(k) - \mathbf{x}_i^d(k)) \right] + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} \omega_i(k) \mathbf{Q}_i^T(k) \mathbf{P} \mathbf{Q}_i(k) \right] \right] \quad (12) \\ \text{s.t. } & \text{C1, C2} \end{aligned}$$

该问题可以分解为鲁棒控制器设计和信息交互决策调度两个子问题。

2.2 无人机鲁棒轨迹跟踪控制器设计

为了实现无人机的最优轨迹跟踪控制，本文在远程控制节点构建鲁棒最优控制器。根据式(11)构建鲁棒最优控制器的优化目标，则控制器可以构建为

$$\begin{aligned} \text{P3: } & \min_{\mathbf{u}_i(t)} \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} (\hat{\mathbf{x}}_i(k) - \mathbf{x}_i^d(k))^T \mathbf{P} (\hat{\mathbf{x}}_i(k) - \mathbf{x}_i^d(k)) \right] \\ \text{s.t. } & \hat{\mathbf{x}}_i(k+1) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_i(k) + \mathbf{B} \mathbf{u}_i(k), k \in [t, t + \Delta T], \forall i \end{aligned} \quad (13)$$

该优化问题是一个线性约束的二次规划问题，常规的二次规划求解器均能快速高效地求解。求解优化问题可以获得无人机 i 在 t 时刻的最优控制序列。

当无人机 i 被调度时，远程控制节点可以根据接收到的最新状态信息求解出新的最优控制指令并传输到无人机 i ，否则，无人机则使用上次传输时的控制指令。无人机 i 的控制指令更新可以表示为

$$\mathbf{u}_i(t) = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,\text{update}}, & D_i(t) = 1 \\ \mathbf{u}_{i,\text{last}}, & D_i(t) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中， $\mathbf{u}_{i,\text{update}}$ 表示当下远程控制节点计算的最新控制指令， $\mathbf{u}_{i,\text{last}}$ 表示无人机在上次更新中获得的控制指令。

2.3 集群更新调度策略设计

为得到一个可行的实时调度方案，本文构建了一个李雅普诺夫优化问题。首先，定义李雅普诺夫函数

$$L_t = \sum_{i=1}^N \theta_i \mathbb{E} \left[\sum_{k=t}^{t+\Delta T-1} \omega_i(k) \mathbf{e}_i^T(k) \mathbf{P} \mathbf{e}_i(k) \right] \quad (15)$$

其中， θ_i 表示不同无人机的权重。在此基础上，得到李雅普诺夫漂移

$$\Delta_t = \mathbb{E} [L_{t+1} - L_t | \mathbf{D}(t)] \quad (16)$$

定义在 t 时刻的惩罚为第 $t+1$ 时刻的误差函数的期望，则惩罚项可以表示为

$$p_i = \sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} \omega_i(k) \mathbf{e}_i^T(k) \mathbf{P} \mathbf{e}_i(k) \right] \quad (17)$$

t 时刻的贪婪的最小化漂移加惩罚项可以表示为

$$\Delta_i + \mathbb{E} [p_i | \mathbf{D}(t)] = \sum_{i=1}^N \left[\mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} (\theta_i + \omega_i(k+1)) \mathbf{e}_i^T(k) \mathbf{P} \mathbf{e}_i(k) \right] - \theta_i \mathbb{E} \left[\sum_{k=t}^{t+\Delta T-1} \mathbf{e}_i^T(k) \mathbf{P} \mathbf{e}_i(k) \right] \right] \quad (18)$$

其中, $\mathbb{E} \left[\sum_{k=t}^{t+\Delta T-1} \mathbf{e}_i^T(k) \mathbf{P} \mathbf{e}_i(k) \right]$ 是一个常数。于是, 最优调度策略可以转化为求解以下优化问题 P4:

$$\min_{\mathbf{D}(t)} \sum_{i=1}^N \left[\mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} (\theta_i + \omega_i(k+1)) \mathbf{e}_i^T(k) \mathbf{P} \mathbf{e}_i(k) \right] \right] \quad (19)$$

s.t. C1, C2

定义函数

$$G_i(t, D_i(t)) = \mathbb{E} \left[\sum_{k=t+1}^{t+\Delta T} (\theta_i + \omega_i(k+1)) \mathbf{e}_i^T(k) \mathbf{P} \mathbf{e}_i(k) \right] \quad (20)$$

其中, $\mathbf{e}_i(k), k \in [t+1, t+\Delta T]$ 的估计可以由状态估计 $\hat{\mathbf{x}}_i(k)$ 、估计误差 $\mathbf{Q}_i(k)$ 、控制指令 $\mathbf{u}_i(k)$ 给出。控制器的控制方法由式(13)确定, 状态估计更新、估计误差更新、控制指令更新策略由式(3)、式(5)、式(14)给出。上述函数的函数值可以通过 $\mathbf{D}(t)$ 唯一确定。值得注意的是, 在调度决策时, 由于还未获得无人机上传的状态, 因此, 使用预测的状态进行调度和控制指令计算。

由于不同的无人机对于目标函数的贡献相互独立, 式(19)优化问题的优化目标可以转化为最大化调度能带来的收益, 于是调度策略转化为求解以下优化问题

$$\text{P5: } \max_{\mathbf{D}(t)} \sum_{i=1}^N D_i(t) G_i(t, 1) + (1 - D_i(t)) G_i(t, 0) \quad (21)$$

s.t. C1, C2

该优化问题的优化目标是 D_i 和 G_i 的线性组合, 使用贪心算法求解出决策结果。

在得到调度决策之后, 被调度的无人机上传状态信息, 远程控制节点使用更新后的状态信息, 重新调用式(13)中的控制器, 给出控制指令, 下发给无人机。

3 仿真实验

本节通过数值仿真来验证所提策略的有效性。基础仿真参数设置见表1。在 $100 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 的区域内部署了一个远程控制节点, 并由这个节点控制无人机集群。为不失一般性, 假设集群中的无人机按照等间隔跟随同一条轨迹进行巡航飞行, 无人机飞行参考轨迹如图3所示。飞行轨迹由两段直线区域、一段密集的半径为 5 m 的小半圆区域和一段半径为 25 m 的大半圆区域构成, 期望飞行速度为 2 m/s 。假设高风险区域如图3中所示, 其具有更高的情境权重。将 UoI 最优的调度策略^[25]作为参考调度策略。

表1 基础仿真参数设置

参数	符号	设定值
采样间隔	T_s	0.1 s
权重矩阵	\mathbf{P}	\mathbf{I}_6
不同无人机的权重	θ_i	1

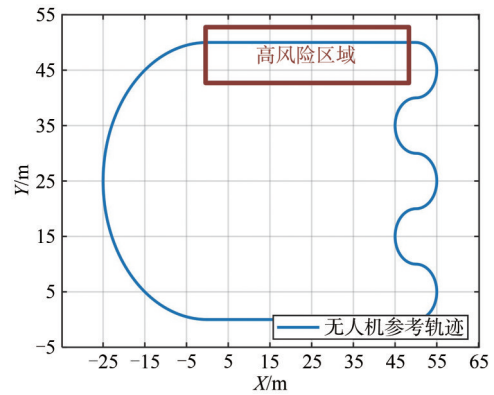


图3 无人机飞行参考轨迹

3.1 情境感知调度性能仿真

仿真实验验证了提出的无人机集群控制情境感知环路更新调度策略。情境感知调度性能仿真参数设置见表2。

表2 情境感知调度性能仿真参数设置

参数	符号	设定值
无人机总数	N	25
每个时隙交互的无人机数目	K	3
预测步长	ΔT	10
高风险区域的情境权重	ω_i	20
非高风险区域的情境权重	ω_i	1
状态转移噪声	\mathbf{w}_i	$\mathcal{N}(\mathbf{0}_{6 \times 1}, 0.1 \times \mathbf{I}_6)$

从无人机集群中, 选取无人机1从坐标原点出发飞行一周的实验结果为例。无人机1的飞行轨迹

如图4所示。无人机1轨迹跟踪误差与调度时隙图如图5所示，图5展示了无人机1在初始直线段、小半径圆环段、高风险直线段和大半径圆环段这4段区域初始内调度的频率和轨迹跟踪误差结果。

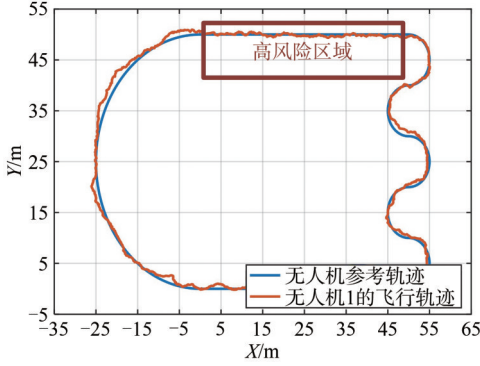


图4 无人机1的飞行轨迹

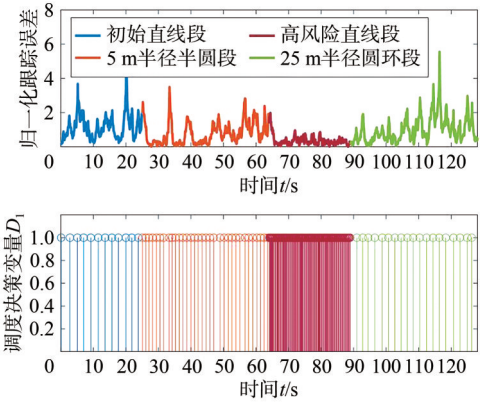


图5 无人机1轨迹跟踪误差与调度时隙图

由图5中可知，无人机在初始直线段时，由于开始时的状态估计误差为0，且直线段的轨迹跟踪不需要频繁更新控制指令，因此调度频率最低。随后，进入半径为5 m的半圆区域，轨迹跟踪的难度上升，需要更频繁地更新控制指令，因此调度频率明显升高。在进入高风险区域后，由于情境权重的提高，无人机的更新变得更为密集，同时轨迹跟踪误差快速下降。最后，在进入25 m半径的半圆区域时，调度频率下降，同时，轨迹跟踪误差上升。

仿真实验证明了调度策略可以根据外部情境信息的紧迫程度、无人机的轨迹跟踪困难程度来动态调整调度频率，从而适应各种无人机控制任务。

3.2 不同无人机数目下的调度性能仿真

本节的实验评估了无人机数量对于集群系统性能的影响。不同无人机数目下的调度性能仿真参数设置见表3。为了反映无人机数目的影响，本实验

不考虑高风险区域的情境权重增加。

表3 不同无人机数目下的调度性能仿真参数设置

参数	符号	设定值
每个时隙交互的无人机数目	K	5
预测步长	ΔT	5
情境权重	ω_i	1
状态转移噪声	w_i	$\mathcal{N}(\mathbf{0}_{6 \times 1}, 0.1 \times \mathbf{I}_6)$

不同无人机数目下的调度性能仿真结果如图6所示。由图6可知，随着无人机数量的增加，由于通信资源逐渐短缺，平均轨迹跟踪误差逐渐增大。在无人机数量较少时，通信资源具有较大冗余，不同的调度策略之间没有显著的性能差异。随着无人机数量的增加，提出的调度策略展现出更好的性能。在无人机数目为25时达到最大值，归一化的轨迹跟踪误差最多可以下降13.74%。随着无人机的数量进一步增加，通信资源过于紧缺以致无法获得足够的控制指令，此时调度策略对于系统性能的影响再次减小。

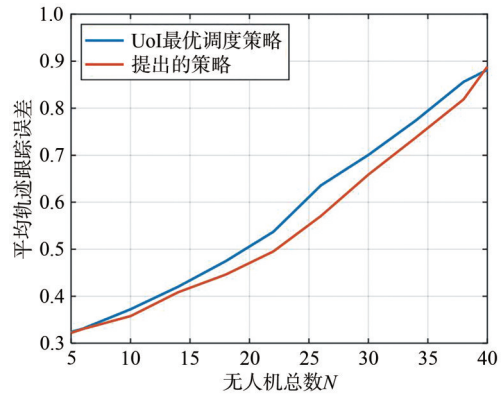


图6 不同无人机数目下的调度性能仿真结果

3.3 不同状态转移噪声下的调度性能仿真

本节的实验评估了调度策略在不同状态转移噪声下的性能。不同状态转移噪声下的调度性能仿真参数设置见表4。假设无人机的状态转移噪声服从零均值的高斯分布 $\mathcal{N}(\mathbf{0}_{6 \times 1}, \Omega \times \mathbf{I}_6)$ 。不同状态转移噪声下的调度性能仿真结果如图7所示，其中， Ω 是

表4 不同状态转移噪声下的调度性能仿真参数设置

参数	符号	设定值
状态转移噪声	w_i	$\mathcal{N}(\mathbf{0}_{6 \times 1}, \Omega \times \mathbf{I}_6)$
每个时隙交互的无人机数目	K	5
预测步长	ΔT	5
情境权重	ω_i	1
无人机总数	N	25

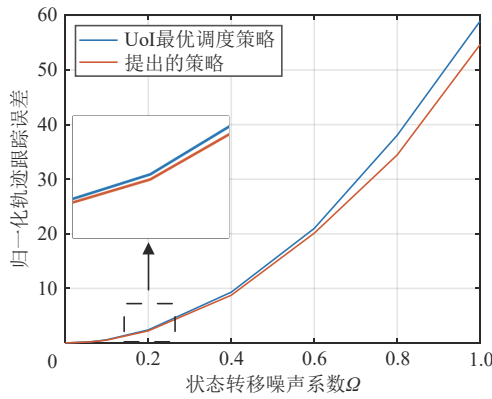


图7 不同状态转移噪声下的调度性能仿真结果

状态转移噪声的系数，该系数可以用于调节状态转移噪声的大小。

由图7可知，随着状态转移噪声的增加，控制误差随之增加。本文提出的方法相比于只考虑状态估计误差的UoI最优调度策略，在不同大小的状态转移噪声下均能实现更小的轨迹跟踪误差，可以使误差平均下降8.36%。

4 结束语

针对通信资源受限的无人机集群控制场景，本文设计了一种无人机集群远程控制框架和相应的控制与更新调度方法，该方法兼顾了上行链路远程控制节点对于无人机状态估计、下行链路无人机控制任务对于控制指令的更新和不同情境信息下的需求。仿真结果表明，提出的调度策略在不同无人机数目下，可以使跟踪误差最多减小13.74%；在不同的状态转移噪声下，可以使跟踪误差平均减小8.36%。下一步的研究将在本文的基础上考虑信道存在不理想的情况，设计更真实的控制任务，将其进一步推广到更真实的系统。

参考文献：

- [1] ZHAO N, LU W D, SHENG M, et al. UAV-assisted emergency networks in disasters[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 45-51.
- [2] LIANG T H, ZHANG T T, WU Q Q, et al. Age of information based scheduling for UAV aided localization and communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(5): 4610-4626.
- [3] DO-DUY T, NGUYEN L D, DUONG T Q, et al. Joint optimization of real-time deployment and resource allocation for UAV-aided disaster emergency communications[J]. IEEE Journal on Selected

- Areas in Communications, 2021, 39(11): 3411-3424.
- [4] LIANG T H, ZHANG T T, YANG J Y, et al. UAV-aided positioning systems for ground devices: fundamental limits and algorithms[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(15): 13470-13485.
- [5] ZHAO Y, LI Z, CHENG N, et al. Joint UAV position and power optimization for accurate regional localization in space-air integrated localization network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(6): 4841-4854.
- [6] YANG J Y, ZHANG T T, WU X L, et al. Efficient scheduling in space-air-ground-integrated localization networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(18): 17689-17704.
- [7] XU C, LI Q W, ZHOU Q K, et al. Power line-guided automatic electric transmission line inspection system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3512118.
- [8] JING W, DENG D, WU Y, et al. Multi-UAV coverage path planning for the inspection of large and complex structures[C]//Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1480-1486.
- [9] ZHU J Q, WU Y X, MA T. Multi-object detection for daily road maintenance inspection with UAV based on improved YOLOv8[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, PP(99): 1-13.
- [10] CHEN S T, LIU G J, ZHOU Z Y, et al. Robust multi-agent reinforcement learning method based on adversarial domain randomization for real-world dual-UAV cooperation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(1): 1615-1627.
- [11] SUN J Y, TANG J, LAO S Y. Collision avoidance for cooperative UAVs with optimized artificial potential field algorithm[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18382-18390.
- [12] CHANG B, TANG W, YAN X Y, et al. Integrated scheduling of sensing, communication, and control for mmWave/THz communications in cellular connected UAV networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(7): 2103-2113.
- [13] WANG Y, WU S H, LEI C J, et al. A review on wireless networked control system: the communication perspective[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(5): 7499-7524.
- [14] LIANG T H, ZHANG T T, CAO B, et al. Sensing, communication, and control co-design for energy-efficient UAV-aided data collection[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(10): 2852-2856.
- [15] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: How often should one update? [C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Piscataway: IEEE Press, 2012: 2731-2735.
- [16] TANG H Y, WANG J T, SONG L Q, et al. Minimizing age of information with power constraints: multi-user opportunistic scheduling in multi-state time-varying channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(5): 854-868.
- [17] SUN Y, POLYANSKIY Y, UYSAL E. Sampling of the Wiener process for remote estimation over a channel with random delay[J].

IEEE Transactions on Information Theory, 2020, 66(2): 1118-1135.

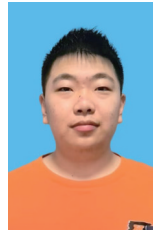
- [18] SUN Y, UYSAL-BIYIKOGLU E, YATES R D, et al. Update or wait: how to keep your data fresh[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2017, 63(11): 7492-7508.
- [19] ZHENG X, ZHOU S, JIANG Z Y, et al. Closed-form analysis of non-linear age of information in status updates with an energy harvesting transmitter[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8): 4129-4142.
- [20] KOSTA A, PAPPAS N, EPHREMIDES A, et al. The cost of delay in status updates and their value: non-linear ageing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 4905-4918.
- [21] KOSTA A, PAPPAS N, EPHREMIDES A, et al. Non-linear age of information in a discrete time queue: stationary distribution and average performance analysis[C]//Proceedings of the ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [22] ZHONG J, YATES R D, SOLJANIN E. Two freshness metrics for local cache refresh[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1924-1928.
- [23] MAATOUK A, KRIOUILE S, ASSAAD M, et al. The age of incorrect information: a new performance metric for status updates[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(5): 2215-2228.
- [24] DE SANT ANA P M, MARCHENKO N, POPOVSKI P, et al. Age of loop for wireless networked control systems optimization[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [25] ZHENG X, ZHOU S, NIU Z S. Urgency of information for context-aware timely status updates in remote control systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7237-7250.
- [26] WANG L H, SUN J Z, SUN Y X, et al. A UoI-optimal policy for timely status updates with resource constraint[J]. Entropy, 2021, 23(8): 1084.
- [27] 牛志升. 面向6G网络的高可靠低延时通信计算与控制[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1267-1282.
NIU Z S. uRLLC³: ultra-reliable and low-latency communication, computing, and control for 6G networks[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(5): 1267-1282.
- [28] CHEN C S, LUO J P, LIANG T H, et al. Re-planning optimization of cooperative vehicle coordination at road intersections[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [29] BAI H J, LI H F, DOU W H, et al. Context-aware timely status updates for trajectory control with limited communication resources[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [30] BRYSON A E, HO Y C. Applied optimal control: optimization, estimation, and control[M]. Rev. printing. Washington: Hemisphere

Pub. Corp., 1975.

[作者简介]



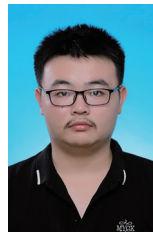
平雨奇(2001-), 男, 哈尔滨工业大学(深圳)博士生, 主要研究方向为无人机集群控制、通信控制协同设计等。



丁华昊(2000-), 男, 哈尔滨工业大学(深圳)硕士生, 主要研究方向为无人机编队控制、多智能体协同控制、网络控制系统等。



梁天豪(1996-), 男, 哈尔滨工业大学(深圳)博士生, 主要研究方向为通信定位一体化、无人机通信、贝叶斯滤波、资源优化和信息时效性等。



梁清泉(2002-), 男, 哈尔滨工业大学(深圳)硕士生, 主要研究方向为无人机控制、通信控制协同设计等。



王祎珍(1993-), 女, 哈尔滨工业大学(深圳)博士生, 主要研究方向为通信控制一体化、自动驾驶汽车通信、信息时效性等。



张霆廷(1980-), 男, 哈尔滨工业大学(深圳)教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长, 主要研究方向为多智能体协同理论与实现、无线定位理论和脉冲超宽带技术等。