

基于李雅普诺夫优化的受限空域无人机边缘计算服务恢复算法

吴鹏飞, 张子涛, 沙超, 黄海平, 肖甫

(南京邮电大学计算机学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 针对受限空域中飞行走廊约束、链路暂时不可用和机载能量不足导致的无人机边缘计算服务中断、尾部任务滞留及时延累积问题, 提出一种基于李雅普诺夫优化的服务恢复算法。本文首先构建服务无人机、补能无人机与前哨补能节点协同模型, 刻画任务执行、能量消耗、预测补能和任务迁移之间的耦合关系; 进一步引入能量赤字、前哨补能负载和迁移任务积压队列, 将长期服务恢复优化转化为单时隙漂移加惩罚最小化问题, 并结合 LKH 路径构建、队列感知补能匹配和全局迁移池实现中断任务接续。仿真结果表明, 在 100~500 个任务点范围内, 与未启用全局迁移池的多 SUAV 策略相比, 所提完整策略将中断任务平均接续时延和服务完成时延分别降低约 65.7% 和 30.8%, 从而改善受限空域无人机边缘计算服务的连续性和恢复效率。

关键词: 无人机边缘计算; 服务恢复; 李雅普诺夫优化; 任务接续

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000

Lyapunov Optimization-Based Service Recovery Algorithm for UAV-enabled Edge Computing in Constrained Airspace

Wu Pengfei, Zhang Zitao, Sha Chao, Huang Haiping, Xiao Fu

School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

Abstract: To address UAV-enabled edge computing service interruptions, tail-task backlogs, and delay accumulation in constrained airspace due to flight-corridor constraints, link intermittency, and energy scarcity, a Lyapunov optimization-based service recovery algorithm is proposed. A collaborative model of service UAVs, charging UAVs, and outpost recharging nodes characterizes the coupling among task execution, energy consumption, predictive recharging, and task migration. Energy-deficit, outpost recharging-load, and migration-task backlog virtual queues transform the long-term service recovery problem into per-slot drift-plus-penalty minimization. LKH-based path construction, queue-aware recharging matching, and a global migration pool enable interrupted tasks to resume across UAVs. Simulations show that, for 100–500 task points, the full strategy reduces the average resumption and service completion delays of interrupted tasks by approximately 65.7% and 30.8%, respectively, relative to its multi-SUAV variant without the global migration pool, thereby improving service continuity and recovery efficiency.

Key words: UAV-enabled edge computing, service recovery, Lyapunov optimization, task resumption

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 肖甫, xiaof@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62202230, No.62272244, No.62125203); 江苏省自然科学基金重点项目 (No.BK20243053); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目 (No. 23KJA520010)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62202230, No.62272244, No. 62125203), The Key Program of Natural Science Foundation of Jiangsu (No.BK20243053); The Natural Science Research Major Project of Jiangsu Province Universities (No. 23KJA520010)

0 引言

随着低空经济、智慧城市和应急通信等应用的发展,无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)网络凭借部署灵活、机动性强和空地链路构建便捷等优势,已成为提升城市感知、弹性覆盖和边缘服务能力的重要载体^[1-5]。UAV与移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)融合形成的UAV-MEC系统,可根据任务位置和业务负载动态调整服务位置,在灾害救援、热点区域覆盖和城市物联网数据采集等场景中兼具空中接入与边缘计算功能,并将感知、计算和回传能力前移至任务区域,为地面网络覆盖不足或临时业务需求突增条件下的时延敏感业务提供支撑^[1-3]。

然而,在受限空域中,预设飞行走廊、禁飞边界和方向性通行规则共同形成受限路径拓扑,使任务访问路径和补能会合位置受到限制;同时,不同任务点的空地通信条件存在空间差异和时变性,可能造成任务链路暂时不可用,进而影响任务数据上传和服务连续性^[6]。此外,UAV受载荷能力和电池容量限制,其飞行、悬停、任务服务以及返航或会合补能产生的能量开销,与任务访问顺序、当前位置和剩余能量状态紧密耦合^[7-8]。当执行服务的UAV因链路状态突变、能量不足或补能等待过长而无法继续服务时,未完成任务将形成积压,并引起恢复等待和任务完成时延累积。因此,受限空域UAV-MEC网络需要建立能够根据链路可用性和能量状态,协调预测式补能、任务保全与跨UAV任务接续的在线服务恢复机制。

现有UAV-MEC研究主要围绕任务卸载、UAV部署、轨迹规划以及通信计算资源分配展开。相关研究通过联合优化UAV飞行高度、部署位置、任务卸载决策和计算资源分配,降低用户响应时延或系统能耗^[9-12];也有研究进一步考虑随机任务到达、异构UAV协同和空地协同计算等因素,构建在线轨迹与资源联合优化模型,以提升动态场景下的边缘服务效率^[13-16]。上述研究为UAV-MEC网络性能优化奠定了基础,但多数工作默认UAV能够按照规划轨迹持续执行任务,或仅将能量消耗作为优化约束,较少处理链路暂时不可用或能量不可行引发的服务中断及其后的任务保全与接续,因而难以满足受限空域长时服务对连续性和恢复效率的要求。

针对UAV续航能力不足的问题,已有研究围绕充电站部署、无线能量传输、移动换电平台、UAV-UGV协同补能和补能调度等展开,通过分配补能机会、规划补能路径或协调地面移动换电设备,缓解电池容量受限对覆盖保持和任务执行周期的影响^[17-20]。其中,AeroBridge从系统实现角度验证了无人机自主电池交接在应急电池服务中的可行性,为会合式补能提供了实现参考^[21]。然而,现有研究多将补能过程作为能量管理、覆盖保持或路径调度问题处理,重点在于延长任务周期或降低补能代价,较少将补能触发与MEC任务状态、服务中断位置和恢复时延统一考虑。在受限空域长时服务中,补能触发过晚可能导致执行任务的UAV因能量不足而中断,触发过早则会增加会合等待和路径调整开销,因而需要根据任务执行状态和能量风险动态确定补能时机,并与中断任务的保全和接续协同决策。

多UAV协同是提升网络覆盖能力、任务执行效率和系统鲁棒性的重要方法,已有研究围绕任务分配、协同路径规划、动态部署、负载均衡和应急组网等问题,通过多平台协同提高任务收益、缩短服务时间或增强网络连通性^[13,19,22-23]。然而,这类方法通常面向任务执行前的静态分配或正常运行阶段的协同优化,并默认任务与执行UAV之间的绑定关系在规划周期内相对稳定。当任务规模、UAV能量状态和链路可用状态动态变化时,中断任务若只能等待原UAV恢复链路或完成补能,容易造成任务滞留和恢复时延累积。因此,需要解除未完成任务与原UAV的固定绑定关系,将其重新纳入全局调度,并由当前满足通信和能量条件的UAV接续执行。

李雅普诺夫(Lyapunov)优化为动态网络中的在线决策和队列稳定控制提供了有效工具,已被广泛用于随机任务卸载、资源分配、轨迹调度和能耗控制等场景^[14-16,24-25]。该方法能够根据当前时隙观测到的任务、信道和资源状态,通过漂移加惩罚框架将长期随机优化问题转化为逐时隙决策问题,从而在队列稳定性和即时性能代价之间建立可调和平衡。应用于受限空域UAV-MEC服务恢复时,除任务队列、链路可用状态和UAV剩余能量外,还需刻画前哨补能负载、补能等待以及链路或能量中断产生的迁移任务积压。现有李雅普诺夫优化研究多

聚焦于正常服务过程中的任务卸载、队列调度或资源分配,尚未充分刻画链路可用性、预测式补能、补能 UAV 辅助恢复和跨 UAV 任务接续之间的耦合关系,因而需要将能量风险、前哨补能压力和迁移任务积压统一纳入在线控制框架。

针对上述问题,本文提出一种基于李雅普诺夫优化的受限空域无人机边缘计算服务恢复算法,主要贡献如下。1) 构建服务 UAV、补能 UAV 与前哨补能节点协同的服务恢复模型,采用受限路径距离刻画飞行约束,并以通信范围、链路可用状态和时隙可观测的等效信道增益描述通信条件,联合刻画任务执行、能量消耗、预测式补能和中断任务接续之间的耦合关系。2) 根据当前链路可用状态动态更新任务可行集,并引入能量赤字、前哨补能负载和迁移任务积压虚拟队列,将长期随机优化问题转化为逐时隙漂移加惩罚上界最小化问题,在抑制三类队列积压的同时,在线权衡补能等待、服务中断与任务完成收益。其中,迁移任务积压包含链路中断和能量中断产生的受影响未完成任务。3) 设计结合 LKH 路径构建、队列感知补能匹配和全局迁移池的在线恢复算法。当服务 UAV 因链路暂时不可用或能量不可行而中断时,将受中断影响的未完成任务移入全局迁移池,并由满足链路、能量和时延约束的可用服务 UAV 接续执行。仿真结果从任务完成率、恢复启动时延、中断任务接续时延和能量安全裕量等方面验证了所提算法的有效性。

1 系统模型

本文考虑如图1所示的受限空域无人机边缘计算网络。系统由服务无人机 (service UAV, SUAV)、分布式前哨补能节点及其配置的补能无人机 (charging UAV, CUAV) 组成。SUAV 搭载轻量化边缘计算单元,沿受限飞行走廊执行区域感知、设施巡检、数据采集和边缘处理等时延敏感任务;前哨补能节点部署在任务区域内的可达位置,每个节点配置一架 CUAV,用于向存在能量风险的 SUAV 配送预先充满的电池并实施会合换电。受飞行走廊、禁飞边界和方向性通行规则影响, SUAV 返回固定基站补能可能产生较大的绕行距离和服务空窗,任务链路的动态变化也可能造成链路暂时不可用。因此,系统根据链路可用状态和能量状态,联合确定任务分配、补能调度和中断任务接续

策略。

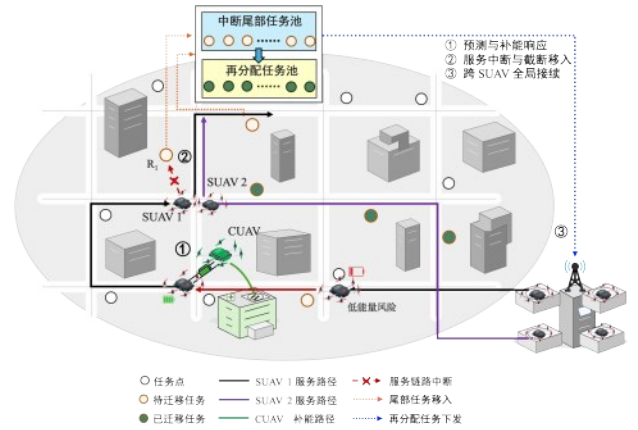


图1 受限空域无人机边缘计算网络服务恢复系统模型

1.1 网络场景模型

考虑一个二维受限空域服务区域。区域内的飞行走廊、禁飞边界和方向性通行规则共同形成受限路径拓扑,用于描述节点之间的可达关系和非均匀通行代价。系统中 SUAV 集合记为 $\mathcal{U} = \{1, 2, \dots, U\}$, 分布式前哨补能节点集合记为 $\mathcal{P} = \{1, 2, \dots, P\}$ 。本文假设 SUAV 资源池规模以及前哨补能节点的数量和位置由系统部署预先给定,不作为优化变量;备用 SUAV 按照既定部署规则激活。每个前哨补能节点配置一架 CUAV,同一时隙内最多响应一个补能请求;CUAV 完成一次会合换电后返回所属前哨节点,并在返回前保持占用状态。任务集合记为 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ 。系统采用离散时隙模型,时隙集合为 $\mathcal{T} = \{0, 1, \dots, T-1\}$ 。在每个时隙 $t \in \mathcal{T}$, 系统观测 SUAV 位置、剩余能量、任务完成状态、链路可用状态、前哨补能节点状态和全局迁移任务池状态,并基于已激活的 SUAV 执行当前时隙调度。

为描述受限空域内飞行走廊和禁飞边界造成的非欧氏路径代价,将可飞行区域抽象为受限路径拓扑,并定义 $d_{i,j}$ 为节点 i 与节点 j 在受限路径拓扑上的等效飞行路径距离,其中,节点可以表示 SUAV 当前位置、任务点或前哨补能节点。针对本文采用的正交飞行走廊,使用加权 Manhattan 距离进行计算,即

$$d_{i,j} = \lambda_x |x_i - x_j| + \lambda_y |y_i - y_j| \quad (1)$$

其中, (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别为节点 i 和节点 j 的二维坐标, λ_x 和 λ_y 表示两类正交飞行走廊方向上的

等效通行权重。当两个方向的通行条件相近且相应权重均取 1 时, 式 (1) 退化为标准 Manhattan 距离; 增大某一方向的权重, 可表征该方向更严格的通行限制或更高的等效绕行代价。式 (1) 仅用于刻画飞行路径代价, 无线通信条件由等效信道增益表征。加权 Manhattan 距离适用于本文采用的正交飞行走廊; 对于非正交走廊或任意障碍布局, 可采用相应受限路径拓扑上的最短可行路径距离。

1.2 任务模型

对于任务集合 $\mathcal{M}$ 中的第 m 个任务, 采用六元组 $(\mathbf{q}_m, D_m^{\text{up}}, C_m, s_m, \rho_m, \tau_m^{\text{max}})$ 表示, 其中, $\mathbf{q}_m$ 为任务位置, D_m^{up} 为任务点向 SUAV 上传的输入数据量, C_m 为完成任务所需的计算周期数, s_m 为 SUAV 在任务点完成任务接入和数据采集所需的服务时间, ρ_m 为任务优先级, τ_m^{max} 为任务最大容忍时延。

定义二进制变量 $a_{u,m}(t)$ 表示时隙 t 内任务 m 是否分配给 SUAV u , 取 1 表示任务 m 由 SUAV u 执行, 否则取 0。每个任务在同一时隙内至多分配给一架 SUAV。定义二进制变量 $z_m(t)$ 表示任务 m 是否在时隙 t 内完成。仅当任务 m 的数据采集、任务数据上传和本地计算过程均已完成时, $z_m(t) = 1$; 否则, $z_m(t) = 0$ 。若链路暂时不可用, 导致任务点未能向 SUAV 完成数据上传, 则该任务保持未完成状态; 任务完成后不再参与后续时隙调度。任务 m 的完成收益由优先级 ρ_m 表征, 因此系统在时隙 t 内的任务收益可由 $\sum_{m \in \mathcal{M}} \rho_m z_m(t)$ 表示。

1.3 通信与计算模型

在执行任务 m 时, SUAV 飞行至任务位置 $\mathbf{q}_m$, 与任务点建立服务连接并完成数据采集。任务点将待处理数据上传至 SUAV 后, SUAV 利用机载边缘计算单元进行本地处理。设 SUAV u 的边缘计算能力为 f_u , 表示单位时间内可执行的 CPU 周期数。任务 m 的计算量为 C_m , 则 SUAV u 处理任务 m 所需的计算时延为 C_m/f_u 。为描述时变通信条件, 设 $h_{u,m}(t)$ 为任务点 m 与 SUAV u 之间的等效信道增益, 并定义链路可用状态 $l_{u,m}(t)$ 。其中, $l_{u,m}(t) = 1$ 表示当前链路可用于任务数据上传, $l_{u,m}(t) = 0$ 表示链路暂时不可用。数据传输首先需满足任务点与 SUAV 之间的通信范围约束; 在距离可达的基础上, $l_{u,m}(t)$ 描述随机链路可用性, $h_{u,m}(t)$ 用于计算可用链路的传输速率。设 P_u^{tx} 、 B_u

和 σ^2 分别为任务点向 SUAV u 传输时采用的发射功率、链路分配带宽和噪声功率, 则时隙 t 内的有效上行传输速率为

$$R_{u,m}(t) = l_{u,m}(t) B_u \log_2 \left(1 + \frac{P_u h_{u,m}(t)}{\sigma^2} \right) \quad (2)$$

若任务点 m 向 SUAV 上传的输入数据量为 D_m^{up} , 则当 $l_{u,m}(t) = 1$ 时, 其通信时延为 $D_m^{\text{up}}/R_{u,m}(t)$ 。此时, SUAV u 执行任务 m 的服务时延为 $\tau_{u,m}(t)$ 。当 $l_{u,m}(t) = 0$ 时, 任务 m 在当前时隙不满足通信可行性, 不能完成任务数据上传。任务调度应同时满足链路可用条件和最大容忍时延约束, 即 $l_{u,m}(t) = 1$ 与 $\tau_{u,m}(t) \leq \tau_m^{\text{max}}$ 。

1.4 能量与补能模型

设 SUAV u 在时隙 t 开始时的剩余能量为 $E_u(t)$, 最大电池容量为 E_u^{max} 。为区分飞行安全约束和长期能量健康状态, 本文设置硬安全阈值 E_u^{min} 和期望储备阈值 E_u^{res} , 其中 $E_u^{\text{res}} > E_u^{\text{min}}$ 。若 $E_u(t) < E_u^{\text{min}}$, 则认为 SUAV 存在飞行安全风险; 若 $E_u(t) < E_u^{\text{res}}$, 则认为 SUAV 存在能量储备不足压力, 并可能在后续调度中触发补能需求。SUAV 在执行任务过程中主要产生飞行能耗、任务服务能耗和悬停等待能耗。对于任意两个节点 i 和 j , SUAV u 的飞行时间为 $\omega_u^{\text{fly}}(i, j) = d_{i,j}/v_u$, 对应飞行能耗为 $e_u^{\text{fly}}(i, j) = P_u^{\text{fly}} \omega_u^{\text{fly}}(i, j)$, 其中, v_u 和 P_u^{fly} 分别为 SUAV u 的平均巡航速度和飞行功率。

当 SUAV u 执行任务 m 时, 其任务服务能耗表示为 $e_{u,m}^{\text{srv}}(t) = P_u^{\text{srv}} \omega_{u,m}^{\text{srv}}(t)$, 其中, P_u^{srv} 为任务服务阶段的平均功率。若 SUAV 因补能调度产生等待时间 $w_{u,m}(t)$, 则悬停等待能耗为 $e_{u,m}^{\text{hov}}(t) = P_u^{\text{hov}} w_{u,m}(t)$, 其中, P_u^{hov} 为悬停功率。当 SUAV u 在任务 m 处的预测剩余能量低于期望储备阈值 E_u^{res} , 或后续任务序列存在能量不可行风险时, 系统为其生成补能请求。定义 $b_{u,m}(t)$ 表示 SUAV u 在时隙 t 内是否于任务 m 处产生补能请求。若 $b_{u,m}(t) = 1$, 则请求 (u, m) 进入补能调度; 否则不生成该请求。定义 $x_{u,m,p}(t)$ 表示请求 (u, m) 是否由前哨节点 p 所配置的 CUAV 响应。若 $x_{u,m,p}(t) = 1$, 则请求 (u, m) 由前哨补能节点 p 响应; 否则 $x_{u,m,p}(t) = 0$ 。

在预测式补能调度下, 若系统预测 SUAV u 在后续任务点 m 附近存在能量不足风险, 则可提前调度前哨节点 p 所配置的 CUAV 前往任务点 m 与 SUAV 汇合。设 SUAV u 到达任务点 m 的预测时间

为 $T_{u,m}^{\text{arr}}(t)$, 前哨节点 p 所配置 CUAV 的可出发时间为 $T_p^{\text{ava}}(t)$, CUAV 从前哨节点 p 飞行至任务点 m 的响应时间为 $d_{p,m}/v_c$, 其中, v_c 为 CUAV 的平均巡航飞行速度。则请求 (u, m) 由前哨节点 p 响应时, SUAV 在任务点 m 处产生的候选等待时间为

$$w_{u,m,p}(t) = \max \left\{ 0, T_p^{\text{ava}}(t) + \frac{d_{p,m}}{v_c} - T_{u,m}^{\text{arr}}(t) \right\} \quad (3)$$

因此, SUAV u 在任务 m 处的实际补能等待时间为 $w_{u,m}(t) = \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{u,m,p}(t) w_{u,m,p}(t)$ 。相应悬停等待能耗可能导致 SUAV 剩余能量低于硬安全阈值 $E_u^{\min}$, 从而引发服务中断。

设 SUAV u 在时隙 t 内的任务访问序列为 $\pi_u(t) = \langle m_{u,1}, m_{u,2}, \dots, m_{u,n_u} \rangle$ 。为刻画该时隙内的能量变化, 定义 $\mathbf{q}_0$ 为 SUAV u 在时隙 t 开始时的位置, $\mathbf{q}_k = \mathbf{q}_{m_{u,k}}$ 为序列中第 k 个任务的位置。则 SUAV u 在时隙 t 内执行任务序列产生的总能量消耗为

$$e_u^{\text{cons}}(t) = \sum_{k=1}^{n_u} \left[e_u^{\text{fly}}(\mathbf{q}_{k-1}, \mathbf{q}_k) + e_{u,m_{u,k}}^{\text{srv}}(t) + e_{u,m_{u,k}}^{\text{hov}}(t) \right] \quad (4)$$

本文采用预充满电池的会合换电方式。为保持时隙级模型简洁, 假设换电操作相对于 CUAV 飞行响应和任务服务时延较短, 可在当前调度时隙内完成, 故不单独计入机械换电时长; CUAV 可出发时间、飞行响应时间以及 SUAV 补能等待时间仍由式 (3) 刻画。完成换电的 SUAV 在下一时隙的初始能量恢复至最大电池容量, 该满电恢复表示换入预先充满的电池, 而非在会合点对原电池持续充电。因此, SUAV u 的能量演化过程可表示为

$$E_u(t+1) = \begin{cases} E_u^{\max}, & \text{若时隙 } t \text{ 内补能完成,} \\ E_u(t) - e_u^{\text{cons}}(t), & \text{否则.} \end{cases} \quad (5)$$

同时, SUAV 能量状态需满足硬安全约束 $E_u(t) \geq E_u^{\min}, \forall u \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T}$ 。

1.5 中断与迁移模型

在受限空域服务过程中, 服务中断可能由能量不可行或任务链路暂时不可用引起。在前哨补能响应能力受限条件下, CUAV 可能无法与 SUAV 在计划任务点及时完成汇合补能, 从而导致 SUAV 产生额外悬停能耗。当 SUAV u 在执行任务序列过程中, 其预测剩余能量不足以支撑补能等待、后续任务执行或满足硬安全约束时, 判定发生能量中断。对于 SUAV u 正在执行且尚未完成的任务 m , 若其

链路状态在相邻时隙间由可用转为暂时不可用, 即由 $l_{u,m}(t-1) = 1$ 转变为 $l_{u,m}(t) = 0$, 则该任务在时隙 t 无法继续完成任务数据上传, 判定发生链路中断。当上述任一情形发生时, 判定 SUAV u 的当前任务服务在时隙 t 发生中断。定义 $I_u(t) \in \{0, 1\}$ 表示 SUAV u 在时隙 t 是否发生服务中断; 若发生中断, 则 $I_u(t) = 1$, 否则 $I_u(t) = 0$ 。

若 SUAV u 在执行任务序列 $\pi_u(t)$ 至任务 $m_{u,k}$ 后因能量不可行发生中断, 则序列中尚未完成的后续任务构成尾部任务集合, 记为 $\mathcal{M}_u^{\text{tail}}(t) = \{m_{u,k+1}, m_{u,k+2}, \dots, m_{u,n_u}\}$ 。若 SUAV u 正在执行且尚未完成的任务 m 因链路状态由可用转为暂时不可用而发生中断, 则将任务 m 记为链路中断任务。链路中断仅影响相应的未完成任务, 其余任务仍可在满足通信与能量可行性时由原 SUAV 继续执行。为保留受中断影响的任务, 本文引入全局迁移任务池 $\mathcal{G}(t)$, 用于暂存能量中断产生的尾部任务和链路中断产生的未完成任务。进入 $\mathcal{G}(t)$ 的任务不立即视为永久失败, 而是在后续时隙重新并入候选任务集合, 由现有 SUAV 集合 $\mathcal{U}$ 根据当前链路可用状态、能量状态、位置和任务负载进行再分配。

本文采用任务级原子接续, 全局迁移任务池由地面控制中心维护, 仅保存任务描述和未完成状态。任务迁移表示任务调度归属的转移, 不涉及中间数据或运行状态在 UAV 之间的直接传输; 接续 SUAV 执行完整服务流程, 由此产生的新增飞行时间、服务时延与能耗均依据更新后的任务序列重新计算。

为描述迁移任务的池内状态, 定义迁移池指示变量 $g_m(t) \in \{0, 1\}$ 。若任务 $m \in \mathcal{G}(t)$, 则 $g_m(t) = 1$, 否则 $g_m(t) = 0$ 。定义二进制变量 $r_{u,m}(t)$ 表示迁移任务 m 是否在时隙 t 由 SUAV u 接续调度。迁移任务只有在位于全局迁移池中时才能被接续, 且同一时隙内至多由一架 SUAV 接收; 执行接续调度的 SUAV 还应满足当前链路可用、服务时延和能量安全条件。当迁移任务 m 在时隙 t 接续执行后成功完成, 即 $z_m(t) = 1$ 时, 该任务不再进入下一时隙的全局迁移任务池 $\mathcal{G}(t+1)$; 否则继续保留在迁移任务池中, 等待后续时隙接续调度。

1.6 联合调度问题描述

基于上述模型, 本文关注受限空域无人机边缘

计算网络中的服务恢复联合调度问题。在每个时隙，系统根据 SUAV 位置、剩余能量、任务完成状态、链路可用状态、前哨补能节点服务状态和全局迁移任务池状态，联合确定任务分配与访问序列、补能调度以及迁移任务接续策略。具体而言，任务分配变量用于确定当前满足通信可行性条件的任务与 SUAV 之间的匹配关系，并据此构建各 SUAV 的任务访问序列；补能调度变量用于确定补能请求与前哨补能节点之间的响应关系；迁移接续变量用于确定全局迁移池内中断任务的接续结果。本文的优化目标是在满足任务链路可用、最大容忍时延、SUAV 硬能量安全和前哨补能节点单服务能力等约束的前提下，提高长期任务完成收益，并降低补能等待和服务中断代价。其中，时变链路状态与 SUAV 能量状态共同决定当前任务可行集，任务分配与访问序列进一步影响飞行能耗、服务时延和补能需求，补能响应结果又会影响服务中断及迁移任务的产生。因此，该问题具有状态时变、整数决策和跨时隙耦合等特征。

2 Lyapunov 优化问题构建

基于前述系统模型，本文将链路感知的任务分配与路径构建、前哨补能调度和迁移任务接续统一纳入长期随机优化框架。由于系统状态与当前调度决策存在跨时隙耦合，静态优化方法难以直接处理。为此，本文引入李雅普诺夫优化方法，将长期能量健康、前哨补能负载和迁移任务积压约束转化为虚拟队列稳定问题，并基于当前时隙观测状态构造在线调度决策。

2.1 长期随机优化问题

在时隙 t 内，系统需要联合确定任务分配、任务访问序列、前哨补能调度和迁移任务接续决策。记 $\mathbf{a}(t)$ 、 $\boldsymbol{\pi}(t)$ 、 $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{r}(t)$ 分别表示时隙 t 的任务分配、任务访问序列、补能调度和迁移接续决策集合。其中， $\boldsymbol{\pi}(t)$ 由所有满足 $a_{u,m}(t) = 1$ 的任务排列构成。为简化表示，定义时隙 t 的单时隙系统代价为

$$J(t) = \frac{\alpha_w}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \tau_m^{\max}} \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{m \in \mathcal{M}} w_{u,m}(t) + \frac{\alpha_i}{U} \sum_{u \in \mathcal{U}} I_u(t) - \frac{\alpha_z}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \rho_m} \sum_{m \in \mathcal{M}} \rho_m z_m(t) \quad (6)$$

其中， α_w 、 α_i 和 α_z 为非负权重系数，分别用于调节补能等待、服务中断和任务完成收益的相对重

要性。为消除不同代价项之间的量纲和取值尺度差异，本文在加权前分别采用任务最大容忍时延总和、SUAV 数量和任务优先级总和，对补能等待、服务中断和任务完成收益项进行尺度归一化。归一化后的各代价项均为无量纲相对量，相应权重为无量纲参数，并满足 $\alpha_w + \alpha_i + \alpha_z = 1$ 。在其他参数不变时，增大 α_w 使调度决策更加偏向缩短补能等待，但可能牺牲部分即时任务收益；增大 α_i 将强化对服务中断风险的抑制，使补能和任务保留决策趋于保守；增大 α_z 则更强调优先完成高收益任务，但可能接受较大的补能等待或中断风险。因此，长期随机优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{P1}: \quad & \min_{\mathbf{a}(t), \boldsymbol{\pi}(t), \mathbf{x}(t), \mathbf{r}(t)} \quad \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}[J(t)] \\ \text{s.t.} \quad & C1 - C9 \end{aligned} \quad (7)$$

其中，各约束定义如下：

$$\begin{aligned} C1: \quad & \sum_{u \in \mathcal{U}} a_{u,m}(t) \leq 1, & \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \\ C2: \quad & \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{u,m,p}(t) \leq b_{u,m}(t), & \forall u \in \mathcal{U}, m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \\ C3: \quad & \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{u,m,p}(t) \leq 1, & \forall p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \\ C4: \quad & \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{u,m,p}(t) \leq 1, & \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \\ C5: \quad & r_{u,m}(t) = a_{u,m}(t) g_m(t), & \forall u \in \mathcal{U}, m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \\ C6: \quad & a_{u,m}(t) \leq l_{u,m}(t), \quad r_{u,m}(t) \leq l_{u,m}(t), & \forall u \in \mathcal{U}, m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \\ C7: \quad & \omega_{u,m}^{\text{srv}}(t) \leq \tau_m^{\max}, & \forall (u, m) : a_{u,m}(t) = 1, t \in \mathcal{T} \\ C8: \quad & E_u(t) \geq E_u^{\min}, & \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \\ C9: \quad & a_{u,m}(t), x_{u,m,p}(t), r_{u,m}(t) \in \{0, 1\}, & \forall u \in \mathcal{U}, m \in \mathcal{M}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \end{aligned}$$

其中，约束 C1 表示任务唯一分配约束，即每个任务在同一时隙内至多由一架 SUAV 执行；约束 C2 表示补能请求响应约束，即只有当 SUAV 在任务点产生补能请求时，系统才可为其分配前哨补能节点；约束 C3 表示前哨节点单服务能力约束，即每个前哨补能节点在同一时隙内最多响应一个补能请求；约束 C4 表示 SUAV 单次补能约束，避免同一架 SUAV 在同一时隙内接受多个前哨节点响应；约束 C5 表示迁移任务接续约束，即只有进入全局迁移任务池的任务才能被重新接续调度；约束 C6 表示链路可用性约束，即普通任务分配和迁移任务接续均只能在相应链路可用时进行；约束 C7 表示任务服务时延约束；约束 C8 表示 SUAV 硬能量安全约束；约束 C9 给出了主要决策变量的二值取值范围。

2.2 虚拟队列构建

问题 P1 中的能量状态、前哨补能负载和迁移任务接续均具有明显的时序耦合特征。当前时隙的任务分配和补能调度不仅影响即时任务完成收益,也会影响后续 SUAV 剩余能量、前哨节点服务压力以及迁移任务积压。为刻画上述长期影响,本小节构建能量赤字队列、前哨补能负载队列和迁移任务积压队列。

首先,为区分硬安全约束和长期能量健康状态,定义 SUAV u 在时隙 t 的能量赤字为

$$\Delta_u^E(t) = \max\{E_u^{\text{res}} - E_u(t), 0\} \quad (8)$$

其中, E_u^{res} 为期望储备阈值。若 $\Delta_u^E(t) > 0$, 则说明 SUAV u 存在能量储备不足压力。时隙 t 内完成的补能操作对该赤字的抵消量记为 $\mu_u^E(t)$ 。由于同一架 SUAV 在一个时隙内至多接受一次补能服务,可令 $\mu_u^E(t) = [E_u^{\text{max}} - E_u(t)] \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{u,m,p}(t)$ 。基于该赤字量,构建能量赤字队列 $Q_u^E(t)$, 其演化过程为

$$Q_u^E(t+1) = \max\{Q_u^E(t) + \Delta_u^E(t) - \mu_u^E(t), 0\} \quad (9)$$

$Q_u^E(t)$ 用于刻画 SUAV 低能量状态的累积压力。若低能量状态持续多个时隙,则分别计入各时隙的能量赤字,以同时反映赤字幅度和持续时间;该队列长期稳定表明系统能够抑制 SUAV 能量赤字累积。

其次,为刻画前哨节点补能响应能力受限带来的潜在服务压力,定义 $A_p^C(t)$ 为时隙 t 映射到前哨节点 p 的潜在补能请求到达量。由于补能请求通常优先关联距离最近的前哨节点,可令

$$A_p^C(t) = \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{m \in \mathcal{M}} b_{u,m}(t) \mathbf{1} \left[p = \arg \min_{p' \in \mathcal{P}} d_{p',m} \right] \quad (10)$$

其中, $\mathbf{1}\{\cdot\}$ 为指示函数。 $A_p^C(t)$ 表示由 SUAV 能量状态和任务位置诱发的潜在补能负载,实际由哪个前哨节点响应请求则由补能调度变量 $x_{u,m,p}(t)$ 决定,若存在多个距离相同的最近前哨节点,则选择编号最小的节点。前哨节点 p 在时隙 t 的实际补能服务量为 $\mu_p^C(t) = \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{u,m,p}(t)$ 。构建前哨补能负载队列 $Q_p^C(t)$, 其演化过程为

$$Q_p^C(t+1) = \max\{Q_p^C(t) + A_p^C(t) - \mu_p^C(t), 0\} \quad (11)$$

若 $Q_p^C(t)$ 长期稳定,则说明前哨节点的潜在补能服务压力不会持续积压。

最后,为刻画被截断尾部任务的迁移接续过程,定义 $A^G(t)$ 为时隙 t 新进入迁移任务池的任务

数量。令 $\mathcal{M}_u^{\text{cut}}(t)$ 表示 SUAV u 在时隙 t 内因能量中断或链路中断而移入全局迁移任务池的任务集合。因此, $A^G(t) = \sum_{u \in \mathcal{U}} |\mathcal{M}_u^{\text{cut}}(t)|$ 。迁移任务的接续服务量记为 $\mu^G(t) = \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{m \in \mathcal{M}} r_{u,m}(t) z_m(t)$, 仅统计在当前时隙接续执行并成功完成的迁移任务。构建迁移任务积压队列 $Q^G(t)$, 其演化过程为

$$Q^G(t+1) = \max\{Q^G(t) + A^G(t) - \mu^G(t), 0\} \quad (12)$$

若 $Q^G(t)$ 长期稳定,则说明由链路中断或能量中断产生的迁移任务能够被后续调度逐步接续完成,而不会持续积压。

由上述队列演化可知,三类队列稳定分别要求长期平均能量赤字不超过补能抵消量、长期平均潜在补能请求量不超过前哨补能服务量,以及长期平均迁移任务到达量不超过接续服务量,对应长期能量健康、前哨负载可服务性和迁移任务可接续性约束。其中, C1—C9 规定单时隙决策的硬可行性,三类虚拟队列的稳定性分别刻画系统的长期能量健康、前哨负载可服务性和迁移任务可接续性要求。

2.3 李雅普诺夫漂移加惩罚函数

基于上述虚拟队列,定义系统在时隙 t 的队列状态为

$$\Theta(t) = (\{Q_u^E(t)\}_{u \in \mathcal{U}}, \{Q_p^C(t)\}_{p \in \mathcal{P}}, Q^G(t)) \quad (13)$$

为刻画系统长期稳定性,构造二次李雅普诺夫函数

$$L(\Theta(t)) = \frac{1}{2} \sum_{u \in \mathcal{U}} (Q_u^E(t))^2 + \frac{1}{2} \sum_{p \in \mathcal{P}} (Q_p^C(t))^2 + \frac{1}{2} (Q^G(t))^2 \quad (14)$$

定义单时隙条件李雅普诺夫漂移为

$$\Delta(\Theta(t)) = \mathbb{E}[L(\Theta(t+1)) - L(\Theta(t)) | \Theta(t)] \quad (15)$$

定理 1 设能量赤字 $\Delta_u^E(t)$ 、能量赤字抵消量 $\mu_u^E(t)$ 、前哨潜在补能负载到达量 $A_p^C(t)$ 、前哨补能服务量 $\mu_p^C(t)$ 、迁移任务到达量 $A^G(t)$ 和迁移任务接续服务量 $\mu^G(t)$ 在任意时隙均有界,则存在与队列状态无关的正常数 B , 使得李雅普诺夫漂移满足

$$\begin{aligned} \Delta(\Theta(t)) \leq & B + \sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u^E(t) \mathbb{E}[\Delta_u^E(t) - \mu_u^E(t) | \Theta(t)] \\ & + \sum_{p \in \mathcal{P}} Q_p^C(t) \mathbb{E}[A_p^C(t) - \mu_p^C(t) | \Theta(t)] \\ & + Q^G(t) \mathbb{E}[A^G(t) - \mu^G(t) | \Theta(t)] \end{aligned} \quad (16)$$

证明 对任意满足 $Q(t+1) = \max\{Q(t) + y(t), 0\}$ 的虚拟队列,有

$$\begin{aligned}
Q^2(t+1) &= (\max\{Q(t) + y(t), 0\})^2 \\
&\leq (Q(t) + y(t))^2 \\
&= Q^2(t) + y^2(t) + 2Q(t)y(t) \quad (17)
\end{aligned}$$

于是可得

$$\frac{1}{2} [Q^2(t+1) - Q^2(t)] \leq \frac{1}{2} y^2(t) + Q(t)y(t) \quad (18)$$

将上述不等式分别应用于能量赤字队列、前哨补能负载队列和迁移任务积压队列，定义

$$\begin{aligned}
y_u^E(t) &= \Delta_u^E(t) - \mu_u^E(t) \\
y_p^C(t) &= A_p^C(t) - \mu_p^C(t) \\
y^G(t) &= A^G(t) - \mu^G(t) \quad (19)
\end{aligned}$$

并代入李雅普诺夫函数定义，可得

$$\begin{aligned}
L(\Theta(t+1)) - L(\Theta(t)) &\leq B(t) + \sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u^E(t) y_u^E(t) \\
&\quad + \sum_{p \in \mathcal{P}} Q_p^C(t) y_p^C(t) + Q^G(t) y^G(t) \quad (20)
\end{aligned}$$

其中，

$$B(t) = \frac{1}{2} \sum_{u \in \mathcal{U}} (y_u^E(t))^2 + \frac{1}{2} \sum_{p \in \mathcal{P}} (y_p^C(t))^2 + \frac{1}{2} (y^G(t))^2 \quad (21)$$

若各队列的到达量和服务量在任意时隙均有界，则存在与队列状态无关的有限常数 $B \geq \mathbb{E}[B(t) | \Theta(t)]$ 。对上式在给定队列状态 $\Theta(t)$ 下取条件期望，并注意 $Q_u^E(t)$ 、 $Q_p^C(t)$ 和 $Q^G(t)$ 在条件期望下为已知量，可得

$$\begin{aligned}
\Delta(\Theta(t)) &\leq B + \sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u^E(t) \mathbb{E}[\Delta_u^E(t) - \mu_u^E(t) | \Theta(t)] \\
&\quad + \sum_{p \in \mathcal{P}} Q_p^C(t) \mathbb{E}[A_p^C(t) - \mu_p^C(t) | \Theta(t)] \\
&\quad + Q^G(t) \mathbb{E}[A^G(t) - \mu^G(t) | \Theta(t)] \quad (22)
\end{aligned}$$

由此得到定理 1 中的漂移上界，定理得证。□

为在保持队列稳定的同时优化系统服务性能，定义漂移加惩罚函数为

$$\Delta_V(\Theta(t)) = \Delta(\Theta(t)) + V \mathbb{E}[J(t) | \Theta(t)] \quad (23)$$

其中， $V > 0$ 为控制参数，用于调节长期队列稳定性和瞬时系统性能之间的权衡。

2.4 单时隙优化问题

根据式 (22) 和式 (23)，在给定队列状态 $\Theta(t)$ 的条件下，漂移加惩罚函数的上界可由当前时隙的队列到达量、服务量和即时系统代价刻画。由于常数 B 与当前决策变量无关，在线决策时可将其忽略，从而得到如下单时隙上界最小化问题：

$$\begin{aligned}
\mathbf{P2} : \quad &\min_{\mathbf{a}(t), \boldsymbol{\pi}(t), \mathbf{x}(t), \mathbf{r}(t)} \sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u^E(t) (\Delta_u^E(t) - \mu_u^E(t)) \\
&\quad + \sum_{p \in \mathcal{P}} Q_p^C(t) (A_p^C(t) - \mu_p^C(t)) \\
&\quad + Q^G(t) (A^G(t) - \mu^G(t)) + V J(t) \quad (24) \\
&\text{s.t.} \quad \text{C1} - \text{C9}
\end{aligned}$$

问题 **P2** 的目标函数由队列加权项和即时性能项组成。前三项分别对应能量赤字、前哨补能负载和迁移任务积压的漂移上界，用于抑制长期能量风险、前哨服务压力和中断任务积压；最后一项用于权衡补能等待、服务中断和任务完成收益。参数 V 用于调节队列稳定性与瞬时服务性能之间的折中。

由 **P2** 可知，当前时隙的服务恢复决策同时包含任务分配、访问序列构建、前哨补能调度和迁移任务接续。上述决策具有显著的时序耦合关系：任务分配与访问序列决定 SUAV 的预测能量轨迹和补能请求集合；前哨补能调度进一步影响补能等待时间和服务中断风险；迁移任务接续用于重新调度由能量中断或链路中断产生的未完成的任务。若直接对 **P2** 进行整体求解，需要同时处理任务分配、补能响应和任务接续等多组二值变量，以及访问序列构建引起的组合优化结构，难以满足在线调度场景下的实时求解需求。

3 问题求解

为近似求解问题 **P2**，本文按照服务恢复过程中的决策顺序构造分阶段在线求解框架。首先，根据当前链路可用状态、SUAV 状态和任务状态筛选通信可行任务，并进行任务分配与访问序列构建；其次，基于预测能量轨迹生成补能请求，并完成队列感知的前哨补能调度；最后，对补能调度后仍存在能量不可行风险的尾部任务执行局部截断，并将能量中断产生的尾部任务以及执行过程中因链路中断而未完成的当前任务纳入全局迁移任务池，供后续时隙接续调度。上述过程将 **P2** 分解为 3 个相互衔接的在线求解步骤。其中，**P3** 通过任务分配与访问序列影响任务完成收益、迁移任务接续服务量和预测能量轨迹；**P4** 通过补能匹配影响能量赤字与前哨负载队列的服务量、补能等待和中断风险；**P5** 通过尾部任务保留与截断影响迁移任务到达量和任务完成收益。3 个阶段依次传递访问序列、补能结果和迁移任务集合，其组合结果构成 **P2** 的单时隙可行决策。

3.1 任务分配与路径构建

在任务分配与路径构建阶段,系统根据当前 SUAV 位置、剩余能量、任务状态、链路可用状态以及迁移任务池状态,对当前仍需调度的任务集合进行滚动更新。设 $\mathcal{M}^{\text{can}}(t)$ 表示时隙 t 内当前具备通信可行性的候选任务集合,包括至少存在一架链路可用 SUAV 的未完成任务和迁移任务池中等待接续的任务。对于任意任务 $m \in \mathcal{M}^{\text{can}}(t)$,至少存在一架 SUAV u 满足 $l_{u,m}(t) = 1$;若任务 m 在当前时隙对所有 SUAV 均暂时不可用,则该任务继续保持未完成状态或保留在全局迁移任务池中,并在后续时隙链路状态更新后重新参与候选任务筛选。当 $l_{u,m}(t) = 0$ 时,任务 m 不能分配给 SUAV u ,即 $a_{u,m}(t) = 0$ 。分配给 SUAV u 的任务集合记为 $\mathcal{M}_u(t)$,对应的开放式任务访问序列记为 $\pi_u(t)$ 。

为刻画任务 m 分配给 SUAV u 所带来的综合代价,定义 $\kappa_{u,m}(t)$ 为任务分配代价,其综合考虑任务位置、任务最大容忍时延、SUAV 当前任务负载以及迁移任务状态。 $\kappa_{u,m}(t)$ 越小,表示任务 m 越适合由 SUAV u 执行。对于给定访问序列 $\pi_u(t)$,其路径距离记为

$$D_u^{\text{path}}(t) = \sum_{k=1}^{|\pi_u(t)|} d_{k-1,k} \quad (25)$$

其中 $\mathbf{q}_0$ 为 SUAV u 在时隙 t 的初始位置, $\mathbf{q}_k$ 为序列中第 k 个任务的位置, $d_{k-1,k}$ 按式 (1) 计算。本文不强制 SUAV 在完成任务序列后返回固定基站,因此路径构建采用开放式路径形式。

由此,任务分配与路径构建子问题可表示为

$$\begin{aligned} \text{P3: } \min_{\mathbf{a}(t), \boldsymbol{\pi}(t)} & \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{can}}(t)} \kappa_{u,m}(t) a_{u,m}(t) \\ & + \lambda_{\pi} \sum_{u \in \mathcal{U}} D_u^{\text{path}}(t) \\ \text{s.t. } & \text{C10} - \text{C13} \end{aligned} \quad (26)$$

其中,各约束定义如下:

$$\begin{aligned} \text{C10: } & \sum_{u \in \mathcal{U}} a_{u,m}(t) = 1, \quad \forall m \in \mathcal{M}^{\text{can}}(t), \\ \text{C11: } & a_{u,m}(t) \leq l_{u,m}(t), \quad \forall u \in \mathcal{U}, m \in \mathcal{M}^{\text{can}}(t), \\ \text{C12: } & \pi_u(t) \in \Pi(\mathcal{M}_u(t)), \quad \forall u \in \mathcal{U}, \\ \text{C13: } & a_{u,m}(t) \in \{0, 1\}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, m \in \mathcal{M}^{\text{can}}(t). \end{aligned}$$

其中,约束 C10 保证每个当前通信可行的候选任务仅分配给一架 SUAV;约束 C11 保证任务只能分配给当前链路可用的 SUAV;约束 C12 要求各

SUAV 的访问序列属于其已分配任务集合的可行排列集合;约束 C13 规定任务分配变量取二值。其中, $\mathcal{M}_u(t) = \{m \in \mathcal{M}^{\text{can}}(t) \mid a_{u,m}(t) = 1\}$ 为分配给 SUAV u 的任务集合, $\Pi(\mathcal{M}_u(t))$ 表示该集合的所有可行访问序列, $\lambda_{\pi} > 0$ 为路径距离权重。

问题 P3 可视为 P2 中任务分配与访问序列构建部分的结构化近似子问题,用于在当前时隙内对候选任务集合进行滚动更新。具体求解时,首先根据当前链路状态剔除链路不可用的 SUAV 任务匹配关系;随后,在剩余可行匹配关系中,根据任务分配代价确定候选任务的初始分配。在完成任务分配后,对每架 SUAV 的已分配任务集合构造开放式 TSP 路径,并采用 LKH 算法求解近似最短访问序列。所得访问序列用于预测 SUAV 能量轨迹并生成补能请求集合,为后续前哨补能调度提供输入。

3.2 队列感知前哨补能调度

在任务分配与路径构建完成后,系统可根据各 SUAV 的访问序列 $\pi_u(t)$ 推演预测能量轨迹,并识别当前时隙内的补能请求集合。定义 $\mathcal{R}(t) = \{(u, m) \mid b_{u,m}(t) = 1\}$ 。其中, $b_{u,m}(t) = 1$ 表示 SUAV u 在执行任务 m 前触发补能请求。若同一架 SUAV 的预测任务序列中存在多个补能触发位置,系统仅保留最早触发的补能请求,因此每架 SUAV 在单个时隙内至多生成一个补能请求。对于请求 $(u, m) \in \mathcal{R}(t)$,系统需要选择一个前哨节点 p 进行响应,即确定补能调度变量 $x_{u,m,p}(t)$ 。

沿用 1.4 节中的预测式会合补能模型,请求 (u, m) 由前哨节点 p 响应时的预计等待时间为 $w_{u,m,p}(t)$ 。为刻画候选补能响应下由补能等待引起的能量中断风险,定义二进制指示变量 $\chi_{u,m,p}(t)$ 。若考虑补能等待后的预测剩余能量低于硬安全阈值 $E_u^{\min}$,则 $\chi_{u,m,p}(t) = 1$,否则 $\chi_{u,m,p}(t) = 0$ 。

结合 P2 中的能量赤字队列、前哨补能负载队列以及即时补能等待和能量中断风险代价,定义请求 (u, m) 由前哨节点 p 响应时的调度增量代价为

$$H_{u,m,p}(t) = \frac{V\alpha_w}{\sum_{m' \in \mathcal{M}} \tau_{m'}^{\max}} w_{u,m,p}(t) + \frac{V\alpha_i}{U} \chi_{u,m,p}(t) - Q_u^E(t) [E_u^{\max} - E_u(t)] - Q_p^C(t) \quad (27)$$

其中,前两项分别刻画归一化补能等待代价和候选响应下的能量中断风险;第三项表示候选补能响应对能量赤字队列的服务收益,第四项表示前哨节点完成一次补能响应对其负载队列的服务收益。由

此, 前哨补能调度子问题可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{P4} : \min_{\mathbf{x}(t)} \quad & \sum_{(u,m) \in \mathcal{R}(t)} \sum_{p \in \mathcal{P}} H_{u,m,p}(t) x_{u,m,p}(t) \\ \text{s.t.} \quad & \text{C14} - \text{C16} \end{aligned} \quad (28)$$

其中, 各约束定义如下:

$$\begin{aligned} \text{C14} : \quad & \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{u,m,p}(t) \leq 1, \quad \forall (u,m) \in \mathcal{R}(t), \\ \text{C15} : \quad & \sum_{(u,m) \in \mathcal{R}(t)} x_{u,m,p}(t) \leq 1, \quad \forall p \in \mathcal{P}, \\ \text{C16} : \quad & x_{u,m,p}(t) \in \{0, 1\}, \quad \forall (u,m) \in \mathcal{R}(t), p \in \mathcal{P}. \end{aligned}$$

约束 C14 表示每个补能请求至多由一个前哨节点响应; 约束 C15 表示每个前哨节点在同一时隙内至多响应一个补能请求; 约束 C16 给出补能调度变量的二值取值范围。

问题 **P4** 是一个带容量约束的二分匹配问题。为降低在线求解复杂度, 本文采用队列感知的贪心匹配策略。首先, 按照能量赤字队列、预计等待时间和补能等待引起的能量中断风险对补能请求进行排序; 然后, 在候选前哨节点集合中选择使 $H_{u,m,p}(t)$ 最小的可行节点进行响应。若某一补能请求在当前时隙未获得可行响应, 则将其对应任务序列纳入后续能量可行性检测, 并在不满足硬能量安全约束时, 由局部截断与全局迁移任务接续阶段进一步处理。

3.3 局部截断与全局迁移任务接续

经过任务分配、路径构建和前哨补能调度后, 若 SUAV u 的任务访问序列仍存在能量不可行风险或补能等待引起的中断风险, 则对尾部任务集合 $\mathcal{M}_u^{\text{tail}}(t)$ 执行局部截断, 优先保留收益较高且执行代价较低的任务, 并将无法保留的任务移入全局迁移任务池。执行过程中因链路暂时不可用而中断的当前任务不参与尾部任务截断, 直接进入全局迁移任务池, 供后续时隙接续调度。

定义二进制变量 $\eta_{u,m}(t)$ 表示尾部任务 m 的局部截断决策。当 $\eta_{u,m}(t) = 1$ 时, 任务 m 在截断后仍由 SUAV u 保留执行; 当 $\eta_{u,m}(t) = 0$ 时, 任务 m 因能量不可行而被截断, 并计入中断迁移任务集合 $\mathcal{M}_u^{\text{cut}}(t)$ 。截断后由 SUAV u 保留执行的尾部任务集合为 $\mathcal{M}_u^{\text{keep}}(t) = \{m \in \mathcal{M}_u^{\text{tail}}(t) \mid \eta_{u,m}(t) = 1\}$ 。链路中断产生的当前未完成的任务同样直接计入 $\mathcal{M}_u^{\text{cut}}(t)$ 。由此, 局部截断子问题可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{P5} : \min_{\eta(t)} \quad & \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{m \in \mathcal{M}_u^{\text{tail}}(t)} Q^G(t) [1 - \eta_{u,m}(t)] \\ & - \frac{V\alpha_z}{\sum_{m' \in \mathcal{M}} \rho_{m'}} \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{m \in \mathcal{M}_u^{\text{tail}}(t)} \rho_m \eta_{u,m}(t) \\ \text{s.t.} \quad & \text{C17} - \text{C19} \end{aligned} \quad (29)$$

其中, 各约束定义如下:

$$\begin{aligned} \text{C17} : \quad & \hat{E}_u(t) \geq E_u^{\min}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, \\ \text{C18} : \quad & \omega_{u,m}^{\text{srv}}(t) \leq \tau_m^{\max}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, m \in \mathcal{M}_u^{\text{keep}}(t), \\ \text{C19} : \quad & \eta_{u,m}(t) \in \{0, 1\}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, m \in \mathcal{M}_u^{\text{tail}}(t). \end{aligned}$$

其中, $\hat{E}_u(t)$ 表示 SUAV u 执行保留任务序列期间的最小预测剩余能量。问题 **P5** 的目标函数由迁移任务积压项和任务收益项组成。第一项用于抑制尾部任务进入全局迁移任务池所引起的任务积压, 第二项用于优先保留收益较高的尾部任务。约束 C17 保证截断后的任务序列满足 SUAV 硬能量安全约束, 约束 C18 保证被保留任务满足服务时延要求, 约束 C19 给出截断决策变量的二值取值范围。

由于问题 **P5** 是带能量和时延可行性约束的二值选择问题, 直接枚举所有尾部任务保留组合会带来较高复杂度。为满足在线调度需求, 本文采用优先级感知的迭代截断策略进行近似求解。具体而言, 首先尝试保留全部尾部任务, 并按照原访问序列保持其相对顺序; 若保留任务集合满足 C17 和 C18, 则无需截断。否则, 系统综合考虑任务收益、预计能耗、服务时延和迁移任务积压压力, 优先截断收益较低且资源占用较高的尾部任务, 并在每次截断后重新计算保留任务集合的能量和时延可行性, 直至 C17 和 C18 同时满足。求解 **P5** 后, 系统将 $\mathcal{M}_u^{\text{cut}}(t)$ 并入全局迁移任务池 $\mathcal{G}(t)$, 供后续时隙重新调度。

3.4 算法流程

算法 1 给出了所提在线服务恢复算法的完整流程。在每个时隙, 系统根据当前观测状态和虚拟队列状态依次近似求解问题 **P3** 至 **P5**, 更新任务分配、访问序列和补能响应, 并将局部截断任务及执行过程中产生的链路中断任务纳入全局迁移任务池, 供后续时隙接续调度。

算法 1 李雅普诺夫优化的无人机边缘计算服务恢复算法

输入 SUAV 集合 $\mathcal{U}$, 前哨节点集合 $\mathcal{P}$, 任务集合 $\mathcal{M}$, 系统参数 $V, \alpha_w, \alpha_i, \alpha_z, \lambda_\pi$, 初始能量状

态、前哨节点状态和全局迁移任务池

输出 各时隙任务分配 $\mathbf{a}(t)$, 访问序列 $\pi(t)$, 补能响应 $\mathbf{x}(t)$, 截断决策 $\eta(t)$ 和虚拟队列状态

1) 初始化虚拟队列 $Q_u^E(0)$, $Q_p^C(0)$ 和 $Q^G(0)$

2) for $t = 0$ to $T - 1$ do

3) 观测 SUAV 位置、剩余能量、任务完成状态、链路状态、前哨节点状态和全局迁移任务池

4) 构造候选任务集合

5) 求解子问题 **P3**, 得到 $\mathbf{a}(t)$ 和 $\pi(t)$

6) 预测 SUAV 能量轨迹, 生成补能请求集合

7) if $\mathcal{R}(t) \neq \emptyset$ then

8) 计算 $H_{u,m,p}(t)$, 并求解子问题 **P4**

9) else

10) 令 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{0}$

11) end if

12) for each $u \in \mathcal{U}$ do

13) if 任务序列存在能量不可行或等待风险 then

14) 求解局部截断子问题 **P5**

15) 将 $\mathcal{M}_u^{\text{cut}}(t)$ 并入全局迁移任务池 $\mathcal{G}(t)$

16) end if

17) end for

18) 执行当前时隙调度决策

19) 将链路中断任务移入全局迁移任务池

20) 更新任务完成状态、SUAV 能量状态、前哨节点状态和全局迁移任务池

21) 根据式(9)、式(11)和式(12)更新虚拟队列

22) end for

算法 1 采用滚动时域在线调度方式, 每个时隙仅依据当前系统状态和虚拟队列状态生成一次分阶段调度决策, 不涉及跨时隙迭代优化。问题 **P3** 至 **P5** 分别通过候选任务筛选与唯一分配、容量受限匹配和迭代截断, 保证任务分配与访问序列、补能响应以及保留任务序列的能量和时延可行性。因此, 算法 1 采用上述近似求解策略时仍满足 **P1** 相应的单时隙硬约束。

为刻画分阶段近似求解对长期性能的影响, 设 Γ 为算法 1 在任意时隙和给定队列状态下生成的组合可行决策与 **P2** 最优解之间的目标值差距统一上界, 该上界包含 **P3** 至 **P5** 的近似误差及阶段间耦合误差。若 Γ 有限且不随时隙、队列状态和控制参数 V 增长, 单时隙队列到达量、服务量和系统代

价有界, 系统负载位于稳定域内部, 且存在使三类虚拟队列具有严格服务裕量的平稳随机可行策略, 则定理 2 给出的队列稳定性和长期性能界成立。

定理 2 在上述条件下, 记 J^* 为问题 **P1** 的最优长期平均系统代价, 则算法 1 生成的能量赤字队列、前哨补能负载队列和迁移任务积压队列均为强稳定, 其期望时间平均总积压为 $O(V)$ 。此外, 算法 1 的长期平均系统代价满足

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}[J(t)] \leq J^* + \frac{B + \Gamma}{V} \quad (30)$$

因此, 算法 1 的长期平均系统代价与问题 **P1** 最优值之间的差距不超过 $(B + \Gamma)/V$ 。

证明 由 Γ 的定义, 算法 1 在任一时隙生成的可行决策所对应的 **P2** 目标值不超过该时隙最优值与 Γ 之和。将该近似决策代入式 (22), 分别与具有严格服务裕量的平稳随机可行策略以及任意逼近 **P1** 最优值的平稳随机可行策略进行比较, 并对所得漂移加惩罚上界进行时间累加和望远镜求和, 可分别得到三类虚拟队列的强稳定性及其期望时间平均总积压的 $O(V)$ 上界, 以及定理所示的长期平均系统代价界。详细推导见附录 1。□

算法 1 的单时隙计算开销主要来自 **P3**、**P4** 和 **P5**。**P3** 中, 链路可用性筛选和任务初始分配需遍历任务与 SUAV 之间的可行匹配关系, 复杂度为 $O(UM)$; 采用 LKH 算法^[26]构建各 SUAV 的任务访问序列, 其平均运行阶约为 $O(M^{2.2})$ 。**P4** 对至多 U 个补能请求进行排序, 并为每个请求遍历 P 个前哨节点, 复杂度为 $O(U \log U + UP)$ 。**P5** 在最坏情况下逐项截断任务, 并在每次截断后重新检查剩余任务的能量和时延可行性, 复杂度为 $O(M^{2.2})$ 。因此, 在固定 LKH 搜索参数的条件下, 算法 1 的单时隙经验复杂度为 $O(M^{2.2} + UM + UP + U \log U)$ 。该算法避免了对任务分配、补能匹配和尾部任务保留组合的穷举, 为本文所考虑的中等规模在线滚动调度提供了计算基础。

4 仿真分析

4.1 仿真设置与评价指标

本文基于 GrADyS-SIM NextGen 构建受限空域 UAV-MEC 服务恢复仿真环境^[27], 并采用 Python 3.11.14 实现所提算法及对比策略。实验运行于搭载 10 核 Apple M1 Pro 处理器和 16 GB 内存的 ma-

表1 仿真参数

参数	取值
任务规模	100, 200, 300, 400, 500
最大 SUAV 数量	20
初始激活 SUAV 数量	1
仿真时长	900 s
任务节点通信范围	40 m
SUAV 飞行高度/速度	20 m, 20 m/s
硬安全能量阈值 $E_u^{\min}$	20 kJ
基础能量储备阈值	50 kJ
飞行能耗系数	0.5 kJ/m
任务服务能耗	2.0 kJ
最大能量容量 $E_u^{\max}$	490.26-1057.84 kJ
代价权重	1/3, 1/3, 1/3
控制参数 V	0.2~3.0

cOS 平台。仿真采用等权正交飞行走廊，取 $\lambda_x = \lambda_y = 1$ 。实验配置 1 个前哨补能节点及其配属的 1 架 CUAV，CUAV 串行响应补能请求；备用 SUAV 根据任务积压状态动态激活。SUAV 初始能量和补能后能量均设为最大能量容量 $E_u^{\max}$ ，其余参数见表 1。由于 3 个代价权重的共同缩放可由控制参数 V 等效吸收，权重仅表征归一化代价之间的相对偏好，故采用表 1 所示的等权设置，并在全部实验中保持不变。

表2 对比策略设置

策略	说明
NR	中断后不执行恢复
SSR	SUAV 返航补能并由原 SUAV 接续
CR	能量中断后由 CUAV 补能，原 SUAV 接续
FTR	剩余能量比例低于 40% 时触发 CUAV 补能
GR	截止时刻优先的贪心分配
SL	基于单队列李雅普诺夫的任务分配
MSNP	关闭全局迁移池，中断任务由原 SUAV 接续
MSGP	所提完整策略，支持中断任务跨 SUAV 接续

为分析不同恢复方式并验证在线补能决策和全局迁移池的独立作用，本文设置无恢复策略（no recovery, NR）、SUAV 自恢复策略（SUAV self-recovery, SSR）、CUAV 辅助恢复基线（CUAV-assisted recovery, CR）、固定阈值补能策略（fixed-

threshold recharging, FTR）、传统贪心调度（traditional greedy, GR）、标准单队列李雅普诺夫策略（standard Lyapunov, SL）、多 SUAV 无全局迁移池策略（multi-SUAV no global pool, MSNP）和多 SUAV 全局迁移池策略（multi-SUAV global pool, MSGP），具体设置见表 2。同一组对比实验中，各策略采用相同的任务样本、随机种子、资源配置及能量与通信参数，并按照表 2 所示规则生成任务分配与访问序列。CR 为单 SUAV 反应式恢复基线，不包含在线补能决策和全局迁移池；在模块消融实验中，FTR 与 MSGP 仅补能触发方式不同，MSNP 与 MSGP 仅全局迁移池设置不同。

本文从服务连续性、恢复效率和能量安全性 3 方面评价各策略。服务连续性指标包括任务完成率、任务状态占比以及补能与中断次数；恢复效率指标包括平均服务时延、恢复启动时延、中断任务平均接续时延和平均服务完成时延；能量安全性采用后文定义的能量安全裕量衡量。第 4.2 和 4.3 节的图 2 至图 7 采用固定任务实例进行受控参数扫描，主要观察能量容量和任务规模变化下的机制响应，故不设置误差棒；第 4.2 节表 3 和第 4.4 节图 8-图 9 均基于 20 组独立随机实例，报告运行级指标均值和 95% 置信区间。同组策略采用相同随机种子进行配对比较，其中，图 8 和图 9 随机扰动受限走廊内的候选任务点位置并打乱其顺序，各策略使用一致的任务样本、能量配置和激活 SUAV 数量。第 4.2 至 4.4 节不额外引入随机链路中断，数据传输仍需满足节点通信范围约束。

第 4.5 节在相同距离约束基础上，为各 SUAV—任务对独立生成二状态马尔可夫链路过程，初始状态按稳态分布采样。稳态链路不可用概率固定为 0.1，平均不可用持续时间设置为 1~5 个时隙，对应的不可用至可用转移概率分别为 1、0.5、0.333、0.25 和 0.2，可用至不可用转移概率分别为 0.111、0.056、0.037、0.028 和 0.022，以表征由短时波动至持续性遮挡的不同中断情形。当迁移任务改由另一架 SUAV 接续时，其链路状态由新的 SUAV—任务对对应的马尔可夫过程确定；原链路状态不直接继承，但接续链路仍可能转为不可用并再次触发链路中断处理。图 10 和图 11 固定任务规模为 300、SUAV 数量为 3，并采用不触发能量中断的能量配置；MSNP 与 MSGP 使用相同的任务样本和链路状

态序列, 结果为20组独立随机实例的均值及95%置信区间。第4.6节中, 图12采用固定任务实例考察控制参数变化; 多前哨匹配、小规模精确求解和在线测时实验均采用20组独立随机实例, 分别报告配对统计结果、平均加性差距以及决策时间的均值、95%分位数和最大值。全局迁移任务池由地面控制中心维护, 任务重分配通过控制面状态更新完成; 迁移开销主要来自接续SUAV重新访问任务点及执行完整服务流程产生的飞行与服务开销。

4.2 能量触发分析

为分析能量受限条件下预测式补能机制的触发特性, 本文在固定任务规模下改变SUAV最大能量容量 $E_u^{\max}$, 统计预测式补能次数和服务中断次数, 以检验该机制能否提前识别能量风险, 并确定系统由连续服务转入显式中断恢复状态的临界区间。图2显示, 当 $E_u^{\max}$ 较高时, 系统不触发补能或中断; 当其降低至187 kJ附近时, 预测式补能机制开始启动, 而服务中断次数仍为0, 说明该机制能够前摄处理能量风险。随着 $E_u^{\max}$ 进一步降低, 补能次数持续增加, 表明系统需要更频繁地借助CUAV维持服务连续性。

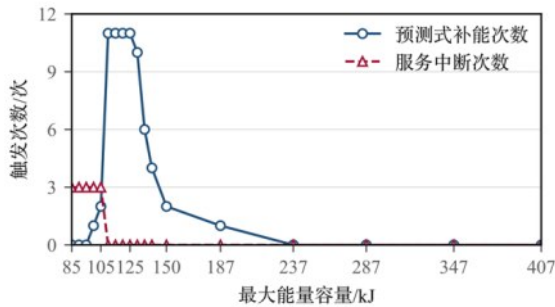


图2 不同最大能量容量下的预测式补能与服务中断次数

为刻画连续服务向中断恢复转变的边界, 将SUAV在一次能量中断后完成补能并重新启动未完

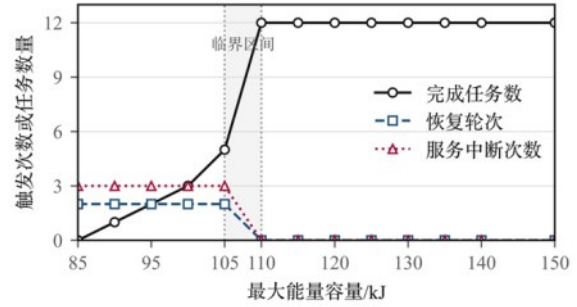


图3 低能量区间内的服务连续性阈值

成任务序列记为1个恢复轮次, 未重新启动则不计。图3展示了低能量区间内完成任务数、恢复轮次和服务中断次数的变化。当 $E_u^{\max} > 105$ kJ 时, 系统能够完成全部任务且未发生服务中断; 当 $E_u^{\max} = 105$ kJ 时, 完成任务数降至5, 并出现3次服务中断和2个恢复轮次。因此, $E_u^{\max} \in [105, 110]$ 构成当前场景下服务连续性向显式中断恢复转变的临界区间。

为进一步验证在线补能决策的作用, 表3给出了FTR与MSGP在相同任务样本、资源配置和全局迁移池条件下的配对实验结果。表中的0表示20组实验结果均为0, 相应95%置信区间半宽亦为0。任务规模为100时, MSGP将平均服务中断次数由5.10降至0, 补能次数由7.65降至5.25; 任务规模为300和400时, 补能次数分别由5.50和5.75降至4.75和4.20。任务规模为400时, FTR和MSGP的平均中断次数分别为0和0.10, 均处于零或近零水平。结果表明, 在线补能决策的作用随任务负载而变化, 能够在部分负载条件下降低补能频度, 并降低轻负载场景下的服务中断风险。

4.3 基础恢复方式性能分析

为评价CUAV参与能量中断后补能的作用, 本文在受限飞行走廊场景下将任务规模依次设为

表3 FTR与MSGP的补能及中断次数对比

任务规模	中断次数		补能次数	
	FTR	MSGP	FTR	MSGP
100	5.10±0.68	0	7.65±0.44	5.25±0.21
200	0	0	4.25±0.26	4.10±0.14
300	0	0	5.50±0.24	4.75±0.50
400	0	0.10±0.21	5.75±0.52	4.20±0.33
500	0	0	5.00±0.00	5.00±0.00

100、200、300、400 和 500，比较 NR、SSR 和 CR 3 种基础恢复方式。CR 仅包含能量中断后的 CUAV 补能和原 SUAV 接续，不包含在线补能决策和全局迁移池。各策略采用相同的任务分布、路径构建方法和能量参数；为保持不同任务规模下的能量压力可比，将 $E_u^{\max}$ 设为单机完成相应规模全部任务所需能耗的 35%，取值范围为 490.26~1057.84 kJ，SUAV 初始能量和补能后能量均设为 $E_u^{\max}$ 。定义任务完成率为

$$R_{\text{cmp}} = \frac{1}{|\mathcal{M}|} \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{m \in \mathcal{M}} z_m(t) \quad (31)$$

其中， $z_m(t)$ 为任务完成状态变量。

图 4 给出了 NR、SSR 和 CR 在不同任务规模下的任务完成率。NR 受能量限制仅能完成部分早期任务，SSR 通过返航补能提高了任务完成率，CR 则在全部任务规模下取得最高完成率。当任务规模为 500 时，NR、SSR 和 CR 的任务完成率分别为 0.292、0.768 和 0.840，CR 较 NR 和 SSR 分别提高 54.8 和 7.2 个百分点，表明 CUAV 参与能量中断后补能有助于提高任务完成率。

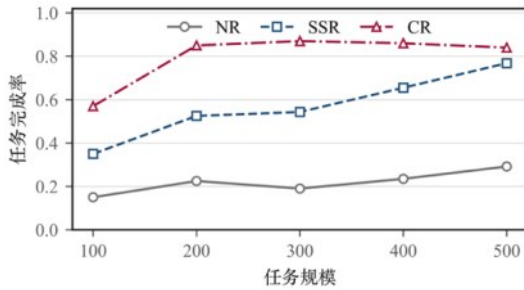


图4 不同任务规模下基础恢复方式的任務完成率

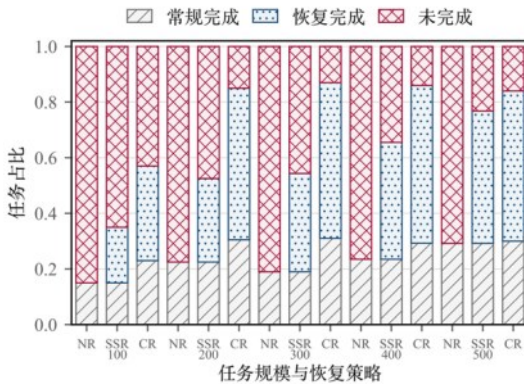


图5 不同任务规模下基础恢复方式的任務状态占比

为进一步分析任务完成率提升的来源，将任务分为常规完成、恢复完成和未完成 3 类，分别表示未经历中断恢复即完成、中断后经恢复机制接续完成，以及仿真结束时仍未完成数据采集、任务数据上传或本地计算。图 5 给出了不同任务规模下 3 类任务状态的占比。CR 在各任务规模下的未完成任务占比均低于 NR 和 SSR，其任务完成率优势主要来自恢复完成任务占比的提高。当任务规模为 500 时，CR 的恢复完成和未完成任务占比分别为 54.0% 和 16.0%，SSR 分别为 47.6% 和 23.2%。结果表明，CUAV 参与中断后补能减少未完成任务，并提高经恢复完成的任务占比。

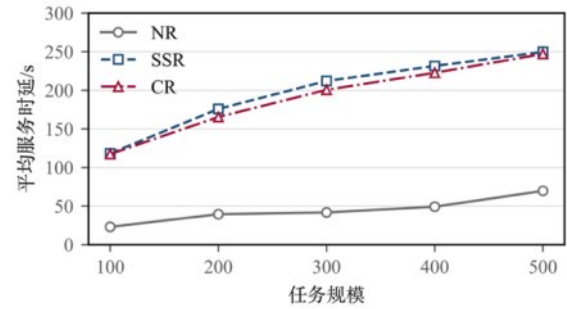


图6 不同任务规模下基础恢复方式的平均服务时延

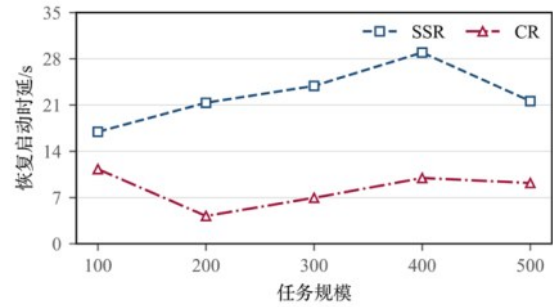


图7 不同任务规模下基础恢复方式的恢复启动时延

本文将平均服务时延定义为已完成任务自生成至地面站接收结果的平均时间。图 6 给出了 NR、SSR 和 CR 在不同任务规模下的平均服务时延。NR 的平均服务时延最低，但其仅完成部分早期任务，因此该指标需结合任务完成率分析。CR 在任务完成率高于 SSR 的同时，平均服务时延与 SSR 接近或略低，表明中断后 CUAV 辅助补能未增加任务结果的平均交付时延。

由于 NR 不执行中断恢复，本文仅比较 SSR 和 CR 的恢复启动时延，将其定义为服务中断触发至

SUAV 完成补能并重新启动未完成的任务的时间间隔。图7显示,在各任务规模下,CR的恢复启动时延均低于SSR。这是因为SSR需要由SUAV返航补能后重新进入任务区域,而CR由CUAV前往中断任务点实施会合换电,减少了SUAV往返补能产生的等待时间。

4.4 中断时延分析

为验证全局迁移池的独立作用并评价在线调度性能,本节比较GR、SL、MSNP和MSGP。GR按照任务截止时刻对任务排序,并选择增量Manhattan行程最小的链路可用SUAV;SL仅维护各SUAV的常规未完成任务积压,并以预测交付时间的 V 加权项与候选SUAV当前任务积压之和作为分配代价。四种策略采用相同的任务样本、能量配置、中断后CUAV恢复机制和最终激活SUAV数量,并统一关闭中断前补能触发。其中,GR、SL和MSGP启用全局迁移池,MSNP关闭全局迁移池并由原SUAV接续中断任务。最大SUAV资源池规模均为20,初始激活1架SUAV。本文采用中断任务平均接续时延和服务完成时延评价恢复性能。前者为已实现接续的中断任务从最后一次服务中断至重新进入执行队列或被其他SUAV接收的平均时间,反映恢复响应速度;后者为已完成中断任务从最后一次服务中断至接续SUAV完成任务点访问并接收任务数据的平均时间,反映中断任务恢复后的服务完成效率。

图8给出了不同任务规模下各策略的中断任务平均接续时延。MSGP在5种任务规模下均取得最低的平均接续时延。对各任务规模的实验均值等权平均后,MSGP的平均接续时延为8.33 s,相较GR和SL分别降低58.5%和41.9%。进一步与MSNP比较,MSGP将平均接续时延由24.29 s降低至8.33 s,降幅约为65.7%。这是因为,MSNP中的中断任务仍需等待原SUAV恢复并重启本地任务队列,而MSGP将其回收到全局迁移池,使其可由当前可用或后续激活的SUAV接续,从而减少任务绑定原SUAV带来的等待。

图9进一步给出了不同任务规模下各策略的中断任务平均服务完成时延。MSGP在各任务规模下的平均服务完成时延均低于GR和MSNP;相较SL,MSGP在100~300任务规模下较低,在400和500任务规模下两者均值接近且置信区间重叠。对

5种任务规模的实验均值等权平均后,MSGP的平均服务完成时延为30.92 s,相较GR和SL分别降低34.1%和11.6%;相较MSNP则由44.69 s降低至30.92 s,降幅约为30.8%。

由于平均服务完成时延仅统计仿真时长内已完成任务点服务的中断任务,还需结合任务滞留情况分析。在100个任务点的20次随机实验中,MSNP均存在仿真结束时仍未完成的中断任务,平均未完成29.1个,而MSGP在20次实验中均完成全部中断任务。这说明在能量受限和动态激活共同作用下,仅依赖原SUAV进行本地恢复可能造成任务滞留;全局迁移池通过解除中断任务与原SUAV的绑定关系,为其提供跨SUAV接续机会,从而降低任务滞留风险。

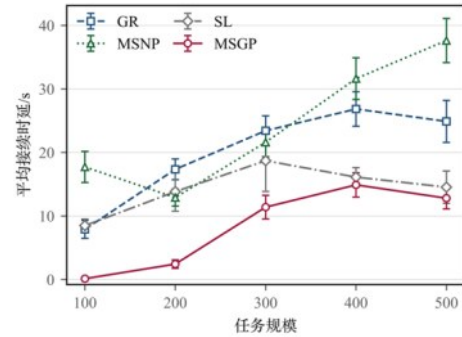


图8 各策略的中断任务平均接续时延

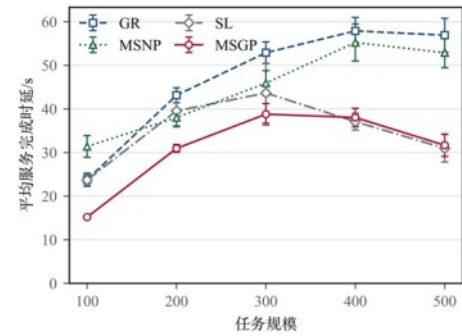


图9 各策略的中断任务平均服务完成时延

4.5 链路中断适应性分析

为考察全局迁移池对持续性链路中断的适应能力,图10给出了稳态链路不可用概率保持为0.1时,MSNP与MSGP的任务完成率随平均链路不可用持续时间的变化。可以看出,随着平均链路不可用持续时间由1个时隙增加至5个时隙,MSNP的任务完成率虽有小幅波动,但总体由99.93%降至

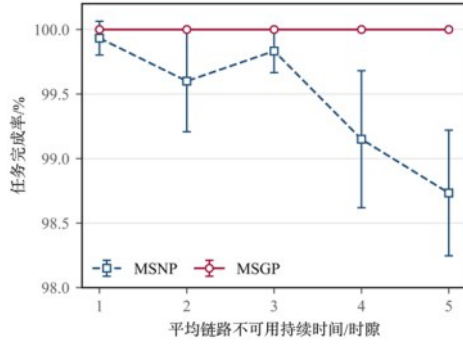


图10 不同链路不可用持续时间下的任务完成率

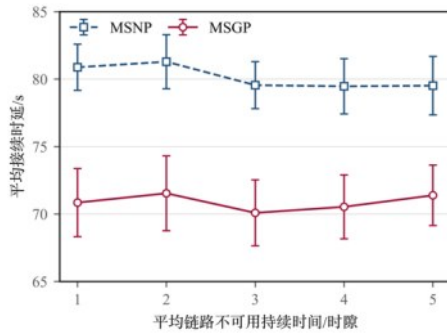


图11 不同链路不可用持续时间下的平均接续时延

98.73%，而MSGP均保持为100%。其原因在于，持续性链路不可用会延长中断任务绑定原SUAV所产生的恢复等待，使少量任务在仿真结束时仍未完成；全局迁移池允许其他链路可用的SUAV接续执行，从而降低任务滞留概率。平均不可用持续时间越长，链路状态的时间相关性越强。

图11进一步给出了不同平均链路不可用持续时间下的中断任务平均接续时延。可以看出，在5种中断持续性条件下，MSGP的平均接续时延均低于MSNP，其取值维持在70.09~71.54 s，相较MSNP降低约10.2%~12.4%。这说明全局迁移池能够解除中断任务与原SUAV的绑定关系，为其提供跨SUAV接续机会，从而缩短不同链路中断持续性条件下的任务恢复等待时间。

4.6 参数敏感性与算法性能分析

为分析李雅普诺夫控制参数 V 对服务性能和能量安全性的影响，本节采用与前文一致的受限飞行走廊设置、任务分布、CUAV辅助补能机制和预测式补能策略，固定任务规模为300，并在表1给出的范围内改变 V ，统计平均服务时延、任务完成率、服务中断次数和能量安全裕量。

本文将能量安全裕量定义为任务执行过程中

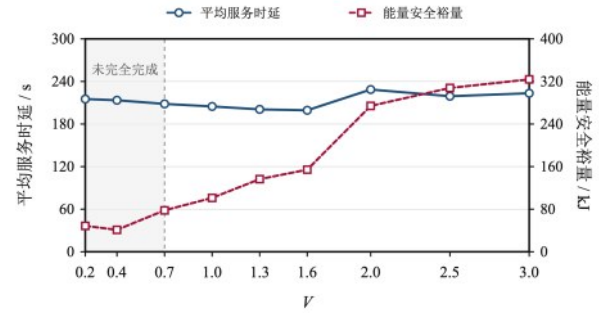


图12 参数敏感性分析

SUAV观测到的最低剩余能量与硬安全能量阈值之间的差值。图12给出了不同 V 取值下的平均服务时延和能量安全裕量变化情况。可以看出，较小的 V 难以提供足够的能量安全冗余，系统仍可能出现服务中断和任务未完成；随着 V 增大，能量安全裕量总体逐步提高，服务中断被抑制。当 V 处于0.7~1.6区间时，系统能够保持任务全部完成且平均服务时延较低；继续增大 V 后，补能触发趋于保守，平均服务时延出现回升。在满足服务连续性要求的候选取值中， $V=1.6$ 对应最低的平均服务时延（199.4 s），同时保持154.3 kJ的能量安全裕量。因此，本文将 $V=1.6$ 作为其余实验的控制参数。

为考察队列感知补能匹配在多前哨节点场景下的性能，设置3个前哨补能节点，每个节点配置1架CUAV，并在300和400个任务规模下各进行20组配对随机实验。相较距离优先匹配，队列感知匹配将平均响应时延降低34.6%~38.1%，负载变异系数降低51.9%~66.7%，CUAV平均往返距离增加29.1%~29.3%，体现了补能响应、节点负载均衡与飞行开销之间的权衡。

进一步在小规模单时隙实例下评估分阶段近似求解质量。实验设置2架SUAV、2个前哨节点及6或8个任务，并采用完全枚举求得相同约束下简化问题的全局最优解。以MSGP目标值与精确最优目标值之差定义加性差距，20组随机实验中，两种任务规模的平均差距分别为0.215和0.194。为评价算法的在线计算能力，设置3架SUAV和3个前哨节点，并在上述硬件平台上采用单进程串行方式统计不同任务规模下的单时隙决策时间，结果见表4。每种规模独立运行20次，计时包含P3至P5的求解过程及LKH调用。

由表4可知，随着任务规模由100增加至500，平均单时隙决策时间由42.6 ms增加至976.3 ms。

表4 不同任务规模下的单时隙在线决策时间

任务规模	平均决策时间/ ms	95%分位数/ ms	最大决策时 间/ms
100	42.6	61.5	85.7
200	116.9	142.5	210.7
300	253.8	349.5	379.3
400	521.9	1066.4	1198.4
500	976.3	1543.2	2396.5

100组实验均得到满足约束的可行决策;500任务规模下的95%分位数和最大决策时间分别为1.54 s和2.40 s。P3中的LKH路径构建占总决策时间的98.1%~99.7%,是主要计算开销。结果表明,所提算法在测试规模下具备毫秒至秒级在线求解能力。

5 结束语

针对受限空域无人机边缘计算中链路暂时不可用、能量受限和补能等待引发的服务中断,本文提出一种基于李雅普诺夫优化的服务恢复算法。算法构建SUAV、CUAV与前哨补能节点协同模型,通过能量赤字、前哨补能负载和迁移任务积压虚拟队列刻画长期约束,并结合LKH路径构建、队列感知补能匹配和全局迁移池实现在线任务接续。仿真结果表明,在线补能决策可在部分负载下降低补能频度和中断风险;MSGP较MSNP将中断任务平均接续时延和服务完成时延分别降低约65.7%和30.8%。在所设链路中断持续性条件下,MSGP均保持100%的任务完成率,并将平均接续时延降低约10.2%~12.4%。后续将研究多CUAV联合轨迹优化、动态任务调度及复杂时变信道下的服务恢复。

附录1定理2的证明由严格服务裕量条件,存在常数 $\epsilon > 0$,使某一平稳随机可行策略下三类虚拟队列的期望服务量与期望到达量之差均不小于 ϵ 。又因单时隙系统代价有界,存在与 V 无关的有限常数 $J_{\max}$,使得 $|J(t)| \leq J_{\max}$ 。根据 Γ ,将算法1的近似决策代入式(22),并与该平稳随机策略比较,可得

(A1)

$$\Delta(\Theta(t)) + V\mathbb{E}[J(t) | \Theta(t)] \leq B + \Gamma + VJ_{\max} - \epsilon \left[\sum_{u \in \mathcal{U}} Q_u^E(t) + \sum_{p \in \mathcal{P}} Q_p^C(t) + Q^G(t) \right]$$

对式(A1)在 $t = 0, \dots, T-1$ 上求和并取全期望,利用相邻时隙李雅普诺夫函数项的相消关系,并根据式(14)所定义的二次李雅普诺夫函数满足 $L(\Theta(T)) \geq 0$,两边

同除以 ϵT 并令 $T \rightarrow \infty$,可得

(A2)

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left[\sum_{u \in \mathcal{U}} \mathbb{E}[Q_u^E(t)] + \sum_{p \in \mathcal{P}} \mathbb{E}[Q_p^C(t)] + \mathbb{E}[Q^G(t)] \right] \leq \frac{B + \Gamma + 2VJ_{\max}}{\epsilon}$$

因此,三类虚拟队列均为强稳定。由于 B 、 Γ 、 $J_{\max}$ 和 ϵ 均不随 V 增长,其期望时间平均总积压为 $O(V)$ 。

进一步选取任意逼近问题P1最优长期平均系统代价 J^* 的平稳随机可行策略。该策略下三类虚拟队列的期望净输入均不大于0,将其代入式(22),并令相应的代价逼近误差趋于0,由 Γ 的定义有

$$\Delta(\Theta(t)) + V\mathbb{E}[J(t) | \Theta(t)] \leq B + \Gamma + VJ^* \quad (\text{A3})$$

对式(A3)取期望并在时间上累加,结合 $L(\Theta(T)) \geq 0$,得到

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}[J(t)] \leq J^* + \frac{B + \Gamma}{V} \quad (\text{A4})$$

结合算法1生成的决策满足问题P1的单时隙硬约束,定理得证。

参考文献:

- [1] 尹浩,魏急波,赵海涛,等.面向有人/无人协同的智能通信与组网关键技术:现状与趋势[J].通信学报,2024,45(1):1-17.
- [2] Kurunathan H, Huang H, Li K, et al. Machine learning-aided operations and communications of unmanned aerial vehicles: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 26(1): 496-533.
- [3] 王海军,赵海涛,任保全,等.一种面向无人机智能通信的信息物理融合框架[J].中国科学:信息科学,2022,52(11):2141-2154.
- [4] 尹浩,魏急波,赵海涛,等.一种面向复杂场景的无线通信节点智能适应架构[J].中国科学:信息科学,2021,51(2):294-304.
- [5] 张亦弛,张平,魏急波,等.面向智能体的语义通信:架构与范例[J].中国科学:信息科学,2022,52(5):907-921.
- [6] 韩政江,周涛,王尔馥.UAV搭载STAR-RIS辅助的空地协同通信性能优化[J].通信学报,2026,47(3):219-232.
- [7] 董超,陶婷,冯斯梦,等.面向无人机自组织网络和车联网的媒体接入控制协议研究综述[J].电子与信息学报,2022,44(3):790-802.
- [8] Wang H, Jiang B, Zhao H, et al. Joint resource allocation on slot, space and power towards concurrent transmissions in UAV ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(10): 8698-8712.
- [9] 屈毓铨,秦篆,马靖豪,等.面向空地协同移动边缘计算的服务布置策略[J].计算机学报,2022,45(4):781-797.
- [10] Hui M, Chen J, Yang L, et al. UAV-assisted mobile edge computing: optimal design of UAV altitude and task offloading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(10): 13633-13647.
- [11] Zhang J, Luo H, Chen X, et al. Minimizing response delay in UAV-assisted mobile edge computing by joint UAV deployment and computation offloading[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2024, 12(4): 1372-1386.

- [12] 张斐斐, 葛季栋, 李忠金, 等. 边缘计算中协作计算卸载与动态任务调度[J]. 软件学报, 2023, 34(12): 5737-5756.
- [13] Li C, Gan Y, Zhang Y, et al. A cooperative computation offloading strategy with on-demand deployment of multi-UAVs in UAV-aided mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2024, 21(2): 2095-2110.
- [14] Yang Z, Bi S, Zhang Y J A. Online trajectory and resource optimization for stochastic UAV-enabled MEC systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(7): 5629-5643.
- [15] Hu H, Chen Z, Zhou F, et al. Joint resource and trajectory optimization for heterogeneous-UAVs enabled aerial-ground cooperative computing networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(7): 8812-8826.
- [16] Xu Y, Zhang T, Liu Y, et al. UAV-assisted MEC networks with aerial and ground cooperation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(12): 7712-7727.
- [17] Song Z, Chin K W, Yang C, et al. Methods to assign UAVs for K-coverage and recharging in IoT networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(4): 2504-2519.
- [18] Qin P, Wu X, Fu M, et al. Latency minimization resource allocation and trajectory optimization for UAV-assisted cache-computing network with energy recharging[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(8): 5715-5728.
- [19] 朱雨超, 王少尉. 物联网数据收集集中基于负载均衡的无人机-车联合轨迹规划[J]. 通信学报, 2024, 45(1): 41-53.
- [20] Lin X, Yazicioglu Y, Aksaray D. Robust planning for persistent surveillance with energy-constrained UAVs and mobile charging stations[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 4157-4164.
- [21] Seth A, James A, Kuantama E, et al. AeroBridge: autonomous drone handoff system for emergency battery service[C]//Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2024: 573-587.
- [22] 许云鹏, 谢雅琪, 于然, 等. 感-通-物多目标融合应急无人机路径规划方法[J]. 通信学报, 2024, 45(4): 1-12.
- [23] Ding R, Xu Y, Gao F, et al. Trajectory design and access control for air-ground coordinated communications system with multiagent deep reinforcement learning[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 5785-5798.
- [24] 邝祝芳, 陈清林, 李林峰, 等. 基于深度强化学习的多用户边缘计算任务卸载调度与资源分配算法[J]. 计算机学报, 2022, 45(4): 812-824.
- [25] 邝祝芳, 郭宇敬, 邓晓衡. 基于李雅普诺夫的 RIS 辅助无人机边缘计算网络中任务卸载与资源分配研究[J]. 通信学报, 2024, 45(9): 258-273.
- [26] Helsgaun K. An effective implementation of the Lin - Kernighan traveling salesman heuristic[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 126(1): 106-130.
- [27] Lamenza T, Kamysek J, Souza B, et al. Developing algorithms for the Internet of Flying Things through environments with varying degrees of realism: extended version[EB/OL]. arXiv:2403.12753, 2024[2026-06-20]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.12753>.