

## 可充电无人机辅助数据采集系统的飞行路线与通信调度优化

李茜雯<sup>1</sup>, 陈健锋<sup>1</sup>, 崔苗<sup>1</sup>, 张广驰<sup>1,2</sup>

(1. 广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006;

2. 广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:** 考虑一个可充电无人机辅助的无线传感器网络, 网络包含多个地面终端, 每个终端需要传输大量具有时间敏感性的数据。由于电池容量有限, 无人机无法通过单次飞行任务采集全部终端的数据, 它需要多次返回充电桩补充能量。研究了无人机的终端调度、飞行轨迹、飞行速度与传输速率优化, 在数据生命期内最大化采集的终端数量。变量之间高度耦合且存在离散的二进制变量, 涉及的优化问题难以求解, 故而提出基于随机优化和特征工程思想的算法求解该优化问题。首先, 引入飞行一悬停通信协议降低轨迹优化的复杂度, 然后创新性地提出基于影响因子和随机优选的通信调度算法。该算法通过提取终端上影响无人机服务时间的特征赋予终端优先级, 计算出不同终端服务总数下的最优调度方案, 从而把优化问题简化成多个求解最短耗时的子问题, 并利用块坐标下降法和连续凸近似技术求得子问题的解。仿真结果表明, 与几种基准策略相比, 所提优化算法在不同数据生命期与不同请求服务终端总数的场景下都有显著的性能优势。

**关键词:** 可充电无人机; 数据采集; 数据生命期; 终端调度; 随机优化

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00285

## Trajectory and communication scheduling optimization for the rechargeable UAV aided data collection system

LI Qianwen<sup>1</sup>, CHEN Jianfeng<sup>1</sup>, CUI Miao<sup>1</sup>, ZHANG Guangchi<sup>1,2</sup>

1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** A rechargeable unmanned aerial vehicle (UAV) aided wireless sensor network was considered, which consists of multiple ground terminals with a large amount of time-sensitive data to be collected. Due to the limited battery capacity, the UAV cannot collect the data from all terminals through a single flight mission, and it needs to return to the charging pile to replenish its flight energy several times during the whole mission. The optimization of the terminal scheduling, trajectory, flight speed and transmission rate for the UAV was studied to maximize the number of terminals whose data had been collected within the data lifetime limit. Due to the variable coupling and the existence of discrete binary scheduling variables, the considered optimization problem is difficult to solve. To tackle such a difficulty, an efficient algorithm was proposed based on the stochastic optimization and the feature engineering. Specifically, the flight hover communication protocol was introduced to simplify the UAV flight process. And then a terminal scheduling algorithm was innovatively proposed with the influence factor and the stochastic preference, which extracted the features that affect the service time of the UAV, optimized

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2022-06-17

通信作者: 张广驰, gc Zhang@gdut.edu.cn

基金项目: 广东省科技计划项目 (No.2020A050515010, No.2021A0505030015); 广东特支计划项目 (No.2019TQ05X409); 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室开放课题 (No.SKIL-IoTSC(UM)-2021-2023/ORPF/A04/2022)

**Foundation Items:** The Science and Technology Plan Project of Guangdong Province (No.2020A050515010, No.2021A0505030015), The Special Support Plan for High-Level Talents of Guangdong Province (No.2019TQ05X409), The Open Research Project Programme of the State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City (University of Macau) (No.SKIL-IoTSC (UM)-2021-2023/ORPF/A04/2022)

the weights of the features, and further simplified the optimization problem into multiple subproblems. The subproblems were then solved by using the block coordinate descent and successive convex approximation techniques. Simulation results show that the proposed optimization algorithm achieves significant performance gains over several benchmark schemes in the scenarios with different data lifetime requirements and different numbers of ground terminals.

**Key words:** rechargeable unmanned aerial vehicles, data collection, data lifetime, terminal scheduling, random optimization

## 0 引言

无人机具有高灵活、低成本和广覆盖的特性,在无线通信应用中发挥着重要作用<sup>[1-6]</sup>,能够满足无基础设施地区或大规模灾害期间用户对计算和通信资源的需求,相应的应用场景包括空中基站、数据采集/传播、环境交通监控、监控搜索和救援等<sup>[7-12]</sup>。另一方面,随着无线通信技术的迅速发展,物联网在生活中的应用逐渐增多,然而大多数物联网设备由于尺寸的限制,在能源、计算和存储能力方面均受到相当大的约束。当物联网终端有大量数据需要处理时,如何及时地进行数据采集变得十分重要。利用无人机辅助物联网进行数据采集是一种有效方案<sup>[13]</sup>,因此,研究无人机辅助的无线数据采集系统具有现实意义。

学术界和产业界对无人机辅助无线通信有广泛的研究<sup>[14-19]</sup>,内容涉及无人机辅助基站通信、中继通信、安全通信等。在无人机辅助数据采集方面,能量优化问题备受关注。文献[20]优化多架无人机的轨迹和部署位置,最小化完成采集地面终端数据任务的能耗。文献[21]研究在保证地面终端公平性的同时,如何在带内回程约束下提高无人机数据采集的频谱效率。文献[22-23]联合优化无人机的飞行轨迹和终端调度,提高系统的能量效率。在实际应用中,终端上的待采集数据往往具有生命有效期。文献[24]研究如何在数据采集时间约束下优化无人机的能量效率。文献[25]通过优化飞行轨迹,减少数据多播任务的完成时间。文献[26-27]通过联合优化无人机飞行轨迹、飞行速度以及功率带宽等资源分配,降低任务完成时间。文献[28]研究能耗和时间双重约束下如何降低无人机能耗和任务完成时间。上述研究考虑了无人机通过单次飞行就能完成全部数据采集任务的情况,但没有考虑无人机需要进行多次飞行任务的情况。针对这种情况,文献[29-30]通过优化飞行轨迹和终端调度最小化任务时间。然而,其结果不能用于终端数量多、待传数据量庞大的情况,无人机无法在有限能量和时间限制下服务所有终端,而这也是目前无人机数据采集面临的难题之一。

为解决上述难点,本文研究了一个可充电无人机辅助的数据采集系统,其中请求服务终端数量众多,终端上数据量庞大,需要无人机多次往返充电桩充电,并在终端数据的生命期内尽量多地完成数据采集任务。对此,本文提出一种联合优化无人机的飞行轨迹和终端调度的高效算法。首先,筛选出决定终端所需要的服务时间特征,通过随机优化赋予不同特征权重值从而得到终端优先级。随后,根据终端优先级不断筛选调度收益更高的终端。最后,联合优化无人机飞行轨迹、飞行速度和传输速率,在满足服务时间要求和能耗限制的约束下最大化无人机服务的终端数量。与已有的无人机数据采集研究相比,本文涵盖了无人机连续多次飞行任务的情况,使所研究的系统具有更广的应用范围;本文考虑的地面终端众多,终端上的待传数据量大且具有时效性,能满足许多物联网应用和应急通信的实际场景需求。在本文提出的调度框架下,利用影响因子代替时间成本计算,可实现更快的终端调度方案,并将无人机后续飞行过程的复杂优化问题简化为易于求解的飞行轨迹优化问题,为无人机数据采集的研究提供了一种新思路。本文的创新点总结如下。

1) 考虑无人机机载能量有限的实际情况,允许无人机在能量消耗殆尽前返回充电桩补充能量,充电完成后继续执行任务。同时,考虑了采集数据的时效性,研究在数据生命期内最大化服务终端数量的问题。

2) 提出了全新的终端调度方法来最大化服务终端数量。方法基于特征选择的思想引入影响因子,基于随机优化的思想设计了随机优选算法来获取影响因子权重值,以影响因子加权和确定终端优先级,再基于优先级计算调度方案。该调度方法可在保持低计算复杂度的同时获得优质的调度方案。在确定调度方案后,进一步将剩余优化问题简化为求解飞行任务最小耗时的问题。

3) 所考虑的优化问题具有非凸的结构,优化变量既包含连续变量又包含二进制离散变量,且高度耦合,因此问题的全局最优解难以求得。本文引入

飞行—悬停通信协议解耦时间变量，并提出用户调度方法进行化简，将问题分解成多个子问题，在优化变量解耦、终端的调度策略和化简子问题的变形上具有创新性。

4) 仿真结果表明，与“基于距离”“基于数据量”和“基于聚类结果”几种基准策略相比，本文提出的算法在服务数量上表现更为稳定，且能集合多种策略的优点，对不同的时间要求和终端分布情况有更好的适应性。因此，所提的影响因子和随机优选的终端调度算法具有优越的性能。

## 1 系统模型

可充电无人机辅助数据采集系统模型如图1所示，可充电无人机通过无线数据通信方式从终端采集数据。系统包含  $K$  个请求服务的终端，其中，终端  $i$  的坐标为  $W \triangleq [[w_i, 0]^T | w_i \in \mathbf{R}^2, \forall i \in \mathcal{K}]$ ， $\mathcal{K} \triangleq \{1, \dots, K\}$ ，其待采集的数据量为  $D_i$ 。可充电无人机从充电桩  $q_1 \triangleq [w_0, H]^T$  出发，在数据采集过程中以恒定高度  $H$  在终端上方飞行。终端上数据的生命期为  $T^{\max}$ ，超过生命期数据则无效，故无人机需要在生命期  $T^{\max}$  内从尽可能多的终端采集数据。在飞行期间，无人机受电池电量  $F^{\max}$  的约束，需要在机载电池电量耗光前回到充电桩进行补给，所以无人机可能会从充电桩出发执行多趟飞行任务。设无人机一共从充电桩出发了  $N$  次，以变量  $T^o \triangleq \{T^o(n) | 0 \leq T^o(n) \leq T^{\max}, n \in \mathcal{N}\}$ ， $\mathcal{N} \triangleq \{1, \dots, N\}$  表示第  $n$  趟飞行任务无人机的总耗时，以变量  $q_n(t) = [l_n(t), H]^T, 0 \leq t \leq T(n)$  表示无人机在第  $n$  趟飞行任务中的位置，其中  $l_n(t) \in \mathbf{R}^2$  表示无人机投影在水平面的二维坐标。

设无人机与每个终端之间的信道遵循视距衰

落模型<sup>[4]</sup>。设表示无人机在第  $n$  趟飞行过程中是否为终端  $i$  服务的二进制变量为  $\theta^o(n) = [\theta_1^o(n), \dots, \theta_k^o(n)]$ ， $\theta_i^o(n) \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{K}$ ，其中  $\theta_i^o(n) = 1$  表示无人机在第  $n$  趟飞行任务时间  $T^o(n)$  内可完成终端  $i$  数据采集的任务，那么无人机在第  $n$  趟飞行的  $t$  时刻与终端  $i$  的传输速率  $R_{n,i}^o(t)$  可表示为

$$R_{n,i}^o(t) = B \ln \left( 1 + \frac{P_i^o \rho_0}{\sigma^2 (H^2 + \|l_n(t) - w_i\|^2)} \right), \quad (1)$$

$$\forall i \in \mathcal{K}, 0 \leq t \leq T^o(n)$$

其中， $B$  表示通信带宽， $P_i^o$  表示无人机与终端  $i$  的传输功率， $\rho_0$  表示 1 m 距离处的参考通道功率增益， $\sigma^2$  表示通道噪声的功率。

无人机的能耗主要有通信和飞行推进两方面。无人机从终端  $i$  采集的数据量可表示为

$$D_i = \int_0^{T_i^o(n)} R_{n,i}^o(t) dt \quad (2)$$

其中， $T_i^o(n)$  表示在第  $n$  趟服务终端  $i$  需要的时间。那么第  $n$  趟飞行任务中因通信产生的能耗  $E^i(n)$  为

$$E^i(n) \triangleq \sum_{i=1}^K \theta_i^o(n) \int_0^{T_i^o(n)} P_i^o dt \quad (3)$$

无人机的主要飞行能耗源自推进过程中叶片轮廓阻力和机身阻力，且它们均随无人机飞行速度的变化而变化，能量消耗功率表达式为

$$P(v(t)) \approx P_0 \left( 1 + \frac{3v(t)^2}{U_{\text{tip}}^2} \right) + \frac{P_i v_0}{v(t)} + \frac{1}{2} d_0 \rho s A v(t)^3 \quad (4)$$

其中， $P_0$  和  $P_i$  分别表示叶片悬停状态下的轮廓功率和诱导功率。定义无人机在  $t$  时刻的飞行速度为  $v(t) \triangleq q_n(t)$ ，那么每趟飞行任务的飞行总能量消耗

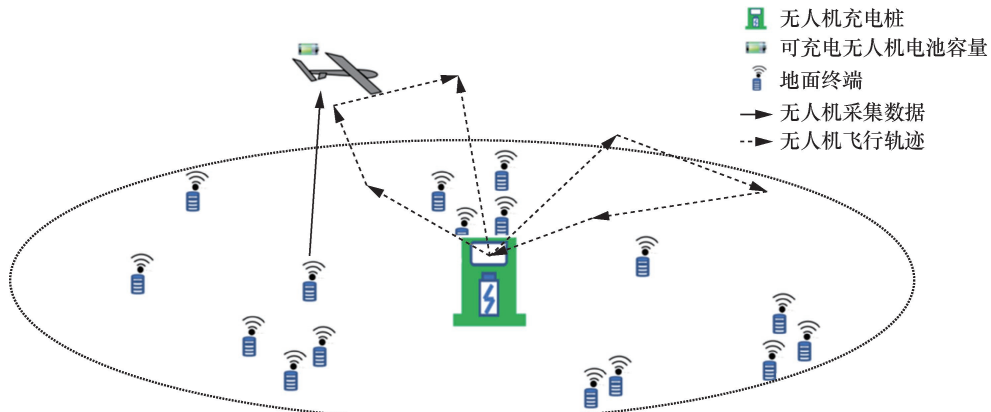


图1 可充电无人机辅助数据采集系统模型

$E^{\text{fly}}(T^o(n), \{q_n(t)\})$  可表示为

$$E^{\text{fly}}(T^o(n), \{q_n(t)\}) \triangleq \int_0^{T^o(n)} P(\|v(t)\|) dt, \quad (5)$$

$$\forall n \in \mathcal{N}, 0 \leq t \leq T^o(n)$$

其中,  $T^o(n)$  表示第  $n$  趟飞行的总时间。

## 2 构建和算法

### 2.1 构建

本文研究最大化服务终端数量的终端调度与飞行轨迹联合优化方法, 通过联合优化终端调度、终端访问顺序、无人机飞行轨迹和飞行速度, 保证无人机在数据生命期  $T^{\text{max}}$  和自身能耗  $F^{\text{max}}$  的约束下最大化服务终端的数量。令变量  $\theta^o \triangleq \{\theta_i^o(n) | \forall n \in \mathcal{N}\}$  表示终端的调度情况, 变量  $\mathbf{Q}^o \triangleq \{q_n(t) | 0 \leq t \leq T^o(n), \forall n \in \mathcal{N}\}$  表示无人机在第  $n$  趟飞行的  $t$  时刻的位置, 变量  $P^i \triangleq \{P_i^i | \forall i \in \mathcal{K}\}$  表示无人机与终端通信的传输功率, 变量  $T^o \triangleq \{T^o(n) | \forall n \in \mathcal{N}\}$  表示无人机第  $n$  趟任务耗时, 变量  $\mathcal{N}$  表示  $T^{\text{max}}$  期间飞行任务次数。所考虑的优化问题的数学描述如下

$$\text{P1: } \max_{\theta^o, \mathbf{Q}^o, T^o, P^i, \mathcal{N}} \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N \theta_i^o(n) \quad (6a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^N T^o(n) \leq T^{\text{max}} \quad (6b)$$

$$\sum_{i=1}^K \theta_i^o(n) T_i^o(n) \leq T^o(n), \forall n \in \mathcal{N} \quad (6c)$$

$$F^{\text{max}} \geq E^{\text{fly}}(T^o(n), \{q_n(t)\}) + E^i(n), \quad (6d)$$

$$0 \leq t \leq T^o(n), \forall n \in \mathcal{N}$$

$$q_n(0) = q_n(T^o(n)) = q_i \quad (6e)$$

$$\sum_{n=1}^N \theta_i^o(n) \leq 1, \forall i \in \mathcal{K} \quad (6f)$$

$$\theta_i^o(n) \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{K} \quad (6g)$$

$$0 \leq P_i^i \leq \theta_i^o(n) P^{\text{max}}, \forall i \in \mathcal{K} \quad (6h)$$

其中, 式(6b)表示飞行服务总时长不超过数据的生命期  $T^{\text{max}}$ , 式(6c)表示无人机在第  $n$  趟飞行中为终端  $i$  服务的时长不超过该趟飞行总时长, 式(6d)表示无人机每趟飞行的能耗不超过其机载电池容量  $F^{\text{max}}$ , 式(6e)表示无人机每次出发地点和返程

终点是充电桩, 式(6f)表示每个终端最多被无人机服务一次, 式(6g)表示终端调度变量的二进制约束, 式(6h)表示无人机和终端的发射功率不超过最大功率  $P^{\text{max}}$ 。

因为优化问题 P1 的目标函数涉及多个优化变量, 变量  $\theta^o$ 、 $\mathbf{Q}^o$  和  $T^o(n)$  高度耦合, 而且约束式(6c)与式(6d)是非凸的, 所以难以求得优化问题 P1 的全局最优解。为解决该问题, 第 2.2 节引入飞行-悬停通信协议和虚拟用时 (VTC, virtual time consumption) 的概念, 拆分无人机的飞行过程, 使问题更容易处理, 同时减少优化变量数量, 降低了无人机能耗计算的复杂度, 方便量化服务每个终端的时间成本。第 2.3 节引入能耗约束下的旅行者问题 (TSPE, travelling salesman problem with energy) 来优化终端的调度顺序, 对无人机的访问路径进行规划, 减少路径重复消耗的时间和能量。第 2.4 节提出从终端计算时间成本中提取时间相关的特征进行计算, 避免计算终端服务时间成本的复杂运算, 把原问题转换成有限数量的简单子问题处理, 并通过随机优选算法得到高质量的近似解。第 2.5 节说明子问题的具体算法。第 2.6 节给出本文的完整算法。

### 2.2 飞行-悬停通信协议

本文考虑终端的待传输数据量较大的情况, 因此主要的数据传输时间和飞行能量消耗主要发生在无人机悬停在终端上方收集数据的阶段。为了降低问题的复杂度和变量数量, 采用飞行-悬停通信协议<sup>[19]</sup>, 把无人机的任务分解为飞行和悬停两个阶段。在该协议中, 无人机依次访问  $K$  个悬停位置, 只有当它在终端相应位置悬停时才与对应终端通信, 并在通信过程中保持悬停状态直至据采集完成。设  $L \triangleq \{l_i | \forall i \in \mathcal{K}\}$  为无人机的水平坐标, 表示给终端  $i$  采集数据时的悬停位置; 设无人机的初始悬停位置为  $\mathbf{q}_i = [l_i, H]^T = [\mathbf{w}_i, H]^T, \forall i \in \mathcal{K}$ , 即初始状态中无人机于终端正上方进行数据采集。此时无人机和终端  $i$  之间的传输速率为

$$R_i = \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_i^i \rho_0}{\sigma^2 (H^2 + \|l_i - \mathbf{w}_j\|^2)} \right), \forall i \in \mathcal{K} \quad (7)$$

无人机为终端  $i$  服务悬停的时间可表示为

$$t_i^d - t_i^a = \frac{D_i}{R_i} \quad (8)$$

其中,  $t_i^d$  和  $t_i^a$  分别表示无人机在服务终端  $i$  的离开时刻和到达时刻,  $D_i$  表示终端  $i$  的传输数据量。对应悬停时间段内产生的能耗由传输和悬停两个部分的能耗组成, 可表示为

$$E_i^h = (t_i^d - t_i^a)(\eta P_i^t + P^h) = \frac{D_i(\eta P_i^t + P^h)}{\text{Blb} \left( 1 + \frac{P_i^t \rho_0}{\sigma^2(H^2 + \|l_i - w_i\|^2)} \right)} \quad (9)$$

其中,  $P^h$  表示无人机的悬停功率。在无人机飞往悬停点的过程中, 设表示所有终端顺序的序列对集合为  $\mathcal{E} \triangleq \{(i, j) | i, j \in \mathcal{K}^a, i \neq j\}$ , 序列对  $(i, j)$  表示从终端  $i$  到终端  $j$  的状态。始末点固定时, 无人机以恒定的速度飞行行为最优方案<sup>[9]</sup>。设  $V \triangleq \{V_{ij} | \forall (i, j) \in \mathcal{E}\}$  表示无人机从终端  $i$  到终端  $j$  的飞行速度,  $P^f$  表示无人机的飞行功率。那么无人机从终端  $i$  飞向终端  $j$  的时间消耗为

$$t_j^a - t_i^d = \frac{\|l_i - l_j\|}{V_{ij}} \quad (10)$$

对应飞行能耗可以化简为

$$E_{ij}^f = \frac{\|l_i - l_j\|}{V_{ij}} P^f = \frac{\|l_i - l_j\|}{V_{ij}} \left( P_0 \left( 1 + \frac{3V_{ij}^2}{U_{\text{tip}}^2} \right) + \frac{P_i v_0}{V_{ij}} + \frac{1}{2} d_0 \rho \& AV_{ij}^3 \right) = \frac{\|l_i - l_j\|}{V_{ij}} \left( \frac{1}{2} d_0 \rho \& AV_{ij}^2 + \frac{3P_0 V_{ij}}{U_{\text{tip}}^2} + \frac{P_0}{V_{ij}} + \frac{P_i v_0}{V_{ij}^2} \right) \triangleq \frac{\|l_i - l_j\|}{V_{ij}} \left( \psi_1 V_{ij}^2 + \psi_2 V_{ij} + \frac{\psi_3}{V_{ij}} + \frac{\psi_4}{V_{ij}^2} \right) \quad (11)$$

其中,  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$  和  $\psi_4$  分别表示与无人机相关的常量<sup>[24]</sup>。

如何选择终端进行服务是本文研究的重点之一, 这需要合理地量化服务每个终端对应的时间成本, 以方便后期的计算与衡量。在计算可充电无人机的时耗时, 需同时考虑不同阶段原有时长和对应能耗在充电桩需要的补给时间。本文把每个终端的时间成本划分为悬停 VTC 和飞行 VTC, 其中, 每段 VTC 包括实际时长和该阶段能耗充电时长。设  $P^r$  表示对无人机的充电功率, 那么无人机与终端  $i$  通信中悬停阶段的 VTC 为

$$T_i^h = t_i^d - t_i^a + \frac{E_i^h}{P^r} = \frac{D_i(\eta P_i^t + P^h + P^r)}{P^r \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_i^t \rho_0}{\sigma^2(H^2 + \|l_i - w_i\|^2)} \right)} \quad (12)$$

从终端  $i$  飞向终端  $j$  飞行的 VTC 为

$$T_{ij}^f = \frac{\|l_i - l_j\|}{V_{ij}} + \frac{E_{ij}^f}{P^r} = \frac{\|l_i - l_j\|}{V_{ij}} \left( \frac{d_0 \rho \& A}{2P^r} V_{ij}^2 + \frac{3P_0}{P^r U_{\text{tip}}^2} V_{ij} + \frac{P_0 + P^r}{P^r V_{ij}} + \frac{P_i v_0}{P^r V_{ij}^2} \right) \triangleq \frac{\|l_i - l_j\|}{V_{ij}} \left( \tau_1 V_{ij}^2 + \tau_2 V_{ij} + \frac{\tau_3}{V_{ij}} + \frac{\tau_4}{V_{ij}^2} \right) \quad (13)$$

其中,  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$  和  $\tau_4$  分别表示与无人机相关的常量<sup>[24]</sup>。视充电桩为终端 0, 那么包括充电桩的终端集合为  $\mathcal{K}^a = \{0\} \cup \mathcal{K}$ 。由于充电时间在 VTC 中已计算, 所以充电阶段的悬停时间与能耗设为 0, 调度变量  $\theta_0$  为 1, 表示充电桩被调度, 具体表示为

$$l_0 = w_0, E_0^h = 0, T_0^h = 0, \theta_0 = 1 \quad (14)$$

### 2.3 TSPE

飞行-悬停通信协议把无人机的服务过程分解成了飞行和悬停过程, 对于离散化的无人机访问轨迹需要进行路径规划, 以减少重复或冗余的飞行过程造成的时间损耗。本文采用 TSPE 计算每个阶段飞行或悬停的能耗, 可以保证路径规划中无人机不会在服务过程耗尽电量。

具体而言, 设终端调度变量为  $\theta \triangleq \{\theta_i | \forall i \in \mathcal{K}^a\}$ , 表示可充电无人机能否在  $T^{\max}$  内完成终端  $i$  的数据采集; 设二进制变量  $X \triangleq \{x_{ij} | \forall (i, j) \in \mathcal{E}\}$  表示对终端的访问顺序, 若  $x_{ij} = 1$  则表示服务过程中存在从终端  $i$  飞往终端  $j$  的路线, 反之  $x_{ij} = 0$ ; 设  $Z \triangleq \{z_{ij} | \forall (i, j) \in \mathcal{E}\}$  表示能耗变化情况, 其中,  $z_{ij}$  表示从本趟飞行任务开始, 到完成终端  $j$  通信的  $t_j^d$  时刻结束, 这一阶段的能耗变化, 其中终端  $j$  的上一采集点为终端  $i$ 。因此优化问题 P1 中对无人机飞行轨迹的约束式(6c)与式(6f)可以等价

$$\sum_{i \in \mathcal{K}} x_{0i} = \sum_{i \in \mathcal{K}} x_{i0} \quad (15a)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{K}^a} x_{ij} = \theta_j, \forall j \in \mathcal{K}^a \quad (15b)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{K}^a} x_{ji} = \theta_j, \forall j \in \mathcal{K}^a \quad (15c)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in \mathcal{E} \quad (15d)$$

其中, 式(15a)表示从充电桩出发的次数与回到充电桩次数相等, 保证无人机的每个子行程的起点和终点都是充电桩; 式(15b)与式(15c)表示  $x_{ij}$  受终端调度变量  $\theta$  的约束; 式(15d)表示  $x_{ij}$  为二进制变量。

TSPE 将优化问题 P1 中的能耗约束式(6d)转换为

$$\sum_{j \in \mathcal{K}^a} z_{ij} - \sum_{j \in \mathcal{K}^a} z_{ji} = \sum_{j \in \mathcal{K}^a} (E_i^h + E_{ij}^f) x_{ij}, \forall i \in \mathcal{K} \quad (16a)$$

$$z_{0i} = x_{0i} E_{0i}^f, \forall i \in \mathcal{K} \quad (16b)$$

$$0 \leq z_{ij} \leq x_{ij} F^{\max}, \forall (i,j) \in \mathcal{E} \quad (16c)$$

其中, 式(16a)表示当  $x_{ij} = 1$  时,  $t_i^a - t_j^a$  时间段内无人机为终端  $i$  使用的能耗等于悬停和飞行过程的能耗之和; 式(16b)表示当无人机从充电桩出发时电池处于满电状态; 式(16c)表示无人机消耗的能量不超过  $F^{\max}$ 。由此, 约束式(16a)~式(16c)通过约束无人机每趟飞行中能耗计算, 得出合理的轨迹路线。此外, 优化问题 P1 中的时间约束式(6b)可转换成式(17), 表示所有悬停阶段和飞行阶段的 VTC 总和在数据生命期  $T^{\max}$  内, 即

$$\sum_{i \in \mathcal{K}^a} \theta_i T_i^h + \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} x_{ij} T_{ij}^f \leq T^{\max} \quad (17)$$

因此, 优化问题 P1 转化成优化问题 P2

$$P2: \max_{\theta, X, V, Z, L, P} \sum_{i=1}^K \theta_i \quad (18a)$$

s.t. 式(14)、式(15a)~式(15d)、式(16a)~式(16c)、式(17)

$$\theta_i \in \{0,1\}, \forall i \in \mathcal{K}^a \quad (18b)$$

$$0 \leq P_i^f \leq \theta_i P^{\max}, \forall i \in \mathcal{K}^a \quad (18c)$$

$$0 \leq V_{ij} \leq \theta_{ij} V^{\max}, \forall (i,j) \in \mathcal{E} \quad (18d)$$

其中, 式(18b)保证了终端调度变量是二进制变量, 式(18c)和式(18d)保证了无人机的传输功率和飞行速度在最大约束范围内,  $V^{\max}$  表示无人机的最大飞行速度。优化问题 P2 需要确定  $T^{\max}$  内服务的具体终端, 故需要计算整个系统所有终端访问顺序的成本, 计算复杂度为  $\mathcal{O}(\mathcal{K}!)$ 。式(17)包括无人机能耗和时耗计算的复杂成本函数, 同样产生大量的计算量。式(15a)~式(15d)和式(16a)~式(16c)包含二进制变量, 为非凸约束。因此, P2 仍然是非确定性多项式问题, 需要进一步的简化以求解。

## 2.4 影响因子及随机优选

对于优化问题 P2 的调度变量  $\theta$ , 在选择服务

终端的过程中, 无人机倾向于选择时间成本更低的终端来服务。然而终端时间成本的计算复杂度高, 有待简化。根据式(12)和式(13), 时间成本主要由终端的待传输数据量和终端之间的距离决定, 即优化算法应选择服务分布更加密集、距离更近且待传输数据量更少的终端。对此, 本文结合了  $K$ -means 聚类<sup>[10]</sup>、特征选取<sup>[11]</sup>和随机优化思想, 从时间成本式(12)和式(13)中提取 5 个特征, 特征的具体选择如下。

1) 设终端待传输的数据量  $D_i$  为特征一, 这是因为传输量(即悬停时间)的计算可直接被量化。

2) 设终端和充电桩之间的距离  $\|l_i - l_0\|$  为特征二, 这是因为该距离决定了无人机从该终端往返充电桩的时长。

3) 设  $K$ -means 聚类后该终端所在簇的规模大小为特征三, 这是因为聚类后通过分析簇的规模(即该簇所含终端数目)可减少选择分布稀疏的终端。

4) 设  $K$ -means 聚类后终端的轮廓系数为特征四, 这是因为它可有效衡量其附近终端密集程度。

5) 求已服务终端的几何中心, 设终端与该几何中心距离为特征五, 这是因为对无人机时间消耗而言, 服务离已确定终端更近的终端, 额外产生的飞行时间消耗更少。

对每个终端的上述 5 个特征进行归一化, 得到终端的影响因子。终端调度过程中, 为影响因子赋予对应的权重值, 表示该影响因子对终端优先级的影响程度。由于终端数量庞大, 难以逐一遍历全部权重组合, 本文提出随机优选算法, 计算终端优先级<sup>[15]</sup>, 具体算法如下。

**步骤 1** 基于本节提取的 5 个特征, 归一化处理后得到 5 个影响因子  $F \triangleq \{f_i \mid \forall i \in \{1,2,3,4,5\}, f_i \in [0,1]\}$ ;

**步骤 2** 随机生成  $N$  组影响因子权重组  $\Omega \triangleq [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5]$ , 计算不同权重组在当前场景条件下最大服务终端数, 记录当前最大服务数量  $\mathcal{K}'$  的最优对应的权重组  $\Omega'$ ;

**步骤 3** 若最优权重组  $\Omega'$  于往后  $N$  组的权重值有更新, 重复步骤 2; 若最优权重组  $\Omega'$  于往后  $N$  组的权重值中最大服务数量  $\mathcal{K}'$  不再变化, 设  $\Omega'$  为此场景权重值  $\Omega_{\text{chosen}}$ , 执行步骤 4;

**步骤 4** 求步骤 1 中影响因子的加权和, 并设为该终端的优先级  $\text{Priority} = \sum_{i=1}^5 \omega_i f_i$ 。

上述算法可以将终端调度问题与无人机能耗和时耗计算解耦合,把所求问题分解成多个终端调度固定条件下的联合优化无人机飞行轨迹、传输功率和飞行速度问题,从而大幅度降低算法的计算复杂度。

## 2.5 无人机功率、速度和轨迹优化

通过第2.4节求出优化问题P2中的调度变量 $\theta$ 后,问题可简化成多个固定 $\theta$ 的优化任务耗时子问题,具体表示为

$$P3: \min_{X,V,P,Z,L} \min_{X,V,P,Z,L} \sum_{i \in \mathcal{K}^a} \theta_i T_i^h + \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} x_{ij} T_{ij}^f \quad (19)$$

s.t. 式(14)、式(15a)~式(15d)、式(16a)~式(16c)、式(18c)~式(18d)

因为优化问题P3含有二进制变量 $Z$ 和 $X$ ,并且式(16b)和式(16c)是非凸约束,所以优化问题P3难以直接求解。为克服此困难,把变量分成 $V$ 和 $P$ 两组分别进行预处理,基于预处理得出的初始值求解 $(X, Z)$ 得到终端的访问顺序,再通过块坐标下降法迭代求解优化问题P3,从而得到该 $\theta$ 下的最短任务耗时。

对 $V$ 和 $P$ 两组变量的预处理中,先后以 $\left( \tau_1 V_{ij}^2 + \tau_2 V_{ij} + \frac{\tau_3}{V_{ij}} + \frac{\tau_4}{V_{ij}^2} \right)$ 和 $T_i^h$ 为优化变量,使用标准的求解器(如CVX)和经典的丁克尔巴赫变换即可求解出飞行速度和传输功率的初始值 $V_i^{\text{ini}}$ 和 $P_i^{\text{ini}}$ ,带入式(9)和式(11)~式(13)可以得到对应的初始值 $E_i^{\text{h,ini}}$ 、 $E_{ij}^{\text{f,ini}}$ 、 $T_i^{\text{h,ini}}$ 和 $T_{ij}^{\text{f,ini}}$ 。由此,通过第2.3节提出的TSPE算法,子问题P3可简化为优化问题P4。

$$P4: \min_{X,Z} \sum_{i \in \mathcal{K}^a} \theta_i T_i^{\text{h,ini}} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} x_{ij} T_{ij}^{\text{f,ini}} \quad (20a)$$

s.t. 式(15a)~式(15b)、式(16c)

$$\sum_{j \in \mathcal{K}^a} z_{ij} - \sum_{j \in \mathcal{K}^a} z_{ji} = \sum_{j \in \mathcal{K}^a} (E_i^{\text{h,ini}} + E_{ij}^{\text{f,ini}}) x_{ij}, \forall i \in \mathcal{K} \quad (20b)$$

$$z_{0i} = x_{0i} E_{ij}^{\text{f,ini}}, \forall i \in \mathcal{K} \quad (20c)$$

在优化问题P4中,优化目标和所有约束都是线性的,使用二进制变量的求解器(如Gurobi)可有效地求解,得到当前调度 $\theta$ 下,终端的访问顺序 $(X, Z)$ 。

为求解最短任务耗时,还需优化无人机每趟子旅程的飞行轨迹 $L$ 、传输功率 $P$ 和飞行速度 $V$ 。设该趟子旅程中服务的终端集合为 $\mathcal{K}^s$ ,包括充电桩的终端集合为 $\mathcal{K}^{\text{a,s}} = \mathcal{K}^s \cup \{0\}$ ,那么无人机经过的路径集合为 $\mathcal{E}^s \triangleq \{(i,j) | i, j \in \mathcal{K}^{\text{a,s}}, x_{ij} = 1\}$ 。基于已有

$(X, Z)$ ,优化问题P3可简化成优化问题P5。

$$P5: \min_{L^s, P^s, V^s} \sum_{i \in \mathcal{K}^s} \frac{D_i (\eta P_i^t + P^{\text{h}} + P^{\text{r}})}{P^{\text{r}} \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_i^t \rho_0}{\sigma^2 (H^2 + \|L_i - \mathbf{w}_i\|^2)} \right)} +$$

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{E}^s} \|V_i - L_j\| \left( \tau_1 V_{ij}^2 + \tau_2 V_{ij} + \frac{\tau_3}{V_{ij}} + \frac{\tau_4}{V_{ij}^2} \right) \quad (21a)$$

$$\text{s.t. Blb} \left( 1 + \frac{P_i^t \rho_0}{\sigma^2 (H^2 + \|L_i - \mathbf{w}_i\|^2)} \right) \geq R^{\text{th}}, \forall i \in \mathcal{K}^s \quad (21b)$$

$$0 \leq P_i^t \leq P^{\text{max}}, \forall i \in \mathcal{K}^s \quad (21c)$$

$$0 \leq V_{ij} \leq V^{\text{max}}, \forall (i,j) \in \mathcal{E}^s \quad (21d)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{K}^s} \frac{D_i (\eta P_i^t + P^{\text{h}})}{\text{Blb} \left( 1 + \frac{P_i^t \rho_0}{\sigma^2 (H^2 + \|L_i - \mathbf{w}_i\|^2)} \right)} +$$

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{E}^s} \|V_i - L_j\| \left( \psi_1 V_{ij}^2 + \psi_2 V_{ij} + \frac{\psi_3}{V_{ij}} + \frac{\psi_4}{V_{ij}^2} \right) \leq F^{\text{max}} \quad (21e)$$

$$L_0 = \mathbf{w}_0 \quad (21f)$$

其中, $L^s \triangleq \{L_i | \forall i \in \mathcal{K}^{\text{a,s}}\}$ , $P^s \triangleq \{P_i^t | \forall i \in \mathcal{K}^s\}$ 和 $V^s \triangleq \{V_{ij} | \forall (i,j) \in \mathcal{E}^s\}$ ,式(21c)和式(21d)给优化变量设定了取值范围,式(21e)由优化问题P3的式(15d)和式(16)演变而成。优化问题P5通过引入松弛变量对式(21e)第一项分母传输速率进行放缩,随后将变量分为 $(V^s, P^s)$ 和 $(L^s, S^s)$ 两组,以固定一组变量求解另一组变量的方式进行迭代求解,直至收敛,其中以上述求得的 $V_i^{\text{ini}}$ 和 $P_i^{\text{ini}}$ 作为迭代初始值。因此,优化问题P3的求解算法具体如下:

**步骤1** 通过 $V$ 和 $P$ 的预处理得到初始飞行速度 $V^s[0] = V^{\text{ini}}$ 、传输功率 $P^s[0] = P_i^{\text{ini}}$ 和初始无人机悬停位置 $H^s[0] = W$ ;

**步骤2** 设传输速率的松弛变量初始值为:

$$S^s[0] = \{S_i[0] | S_i[0] = \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_i^t[0] \rho_0}{\sigma^2 H^2} \right), i \in \mathcal{K}^s\}$$

**步骤3** 求解优化问题P4得到访问顺序 $X[0]$ ,根据式(19)求解优化问题P3,计算该趟飞行任务需要的总耗时为 $T^{\text{total}}[0]$ ;

**步骤4** 设迭代次数 $k=0$ ,阈值 $\varepsilon_0 = 1 \times 10^{-3}$ ;

**步骤5** 通过块坐标下降法分别求解优化问题P5中的 $(V^s[k+1], P^s[k+1])$ 和 $(L^s[k+1], S^s[k+1])$ ;

**步骤6** 令 $k=k+1$ ,并求得总耗时 $T^{\text{total}}[k]$ ;

**步骤7** 保存最短服务耗时 $T^{\text{total}}[k]$ 、终端飞行

速度  $V$ 、无人机飞行轨迹  $L[k]$  和传输功率  $P^s[k]$ ;

**步骤 8** 重复步骤 5~步骤 7, 直到  $(T^{\text{total}}[k] - T^{\text{total}}[k-1]) / T^{\text{total}}[k] > \varepsilon_0$ 。

由此, 得到调度  $\theta$  的最短服务耗时  $T^{\text{total}}[k]$ 、终端飞行速度  $V$ 、无人机飞行轨迹  $L^s[k]$  和传输功率  $P^s[k]$ 。

### 2.6 整体算法

所提算法首先用第 2.2 节中飞行-悬停通信协议把可充电无人机的服务过程解构成飞行和悬停两种状态。然后使用第 2.4 节提出的影响因子和随机优选的算法, 让系统跳过冗长且复杂的终端服务时间成本的计算过程, 赋予终端优先级。随后, 基于优先级求得各服务终端数量情况下的不同终端调度方案, 并逐个增加服务终端数目, 把最大化终端数目的原优化问题拆分成多个计算最小服务时长的子问题, 利用第 2.3 节算法进行无人机路径规划。由此, 第 2.2 至第 2.4 节把问题化简成一系列调度方案下, 即不同的  $\Sigma\theta$  值的优化任务耗时子问题。利用第 2.5 节算法计算上述子问题的最短任务耗时。最后, 通过比较方案的最短服务时长, 得出满足能耗和数据生命期双重约束的终端的访问顺序和无人机飞行轨迹。综上所述, 本文整体算法如下。

**步骤 1** 初始化无人机和系统环境的相关参数。

**步骤 2** 通过第 2.5 节变量预处理得到初始飞行速度  $V^{\text{ini}}$  和传输功率  $P_i^{\text{ini}}$ , 并根据式(9)~式(13)计算每个终端对应的时间成本和能耗。

**步骤 3** 根据第 2.4 节影响因子和随机优选算法构建终端的影响因子  $F$ , 并求解出此环境下的最优权重组  $\Omega_{\text{chosen}}$  和每个终端的优先级。

**步骤 4** 如果  $\sum_{i=1}^K \theta_i = 0$ , 则根据终端优先级确定终端调度  $\theta$ ; 否则基于已选择服务终端更新尚未被调度终端的优先级, 根据终端优先级确定终端调度  $\theta$ 。

**步骤 5** 根据第 2.5 节算法解决第 2.2 至第 2.4 节化简后的子问题 P3, 得到当前调度方案  $\theta$  下最短服务时长  $T^{\text{total}}$  和对应访问顺序  $X$ 、传输功率  $P$ 、飞行速率  $V$  和悬停轨迹  $L$ 。

**步骤 6** 如果  $T^{\text{total}} \leq T^{\text{max}}$ , 保存  $\theta^* = \theta$ 、 $X^* = X$ 、 $P^* = P$ 、 $L^* = L$  和  $V^* = V$ 。

**步骤 7** 重复步骤 4~步骤 6, 直到  $T^{\text{total}} > T^{\text{max}}$ 。

由此, 得到最优调度方案, 其中包括终端调度  $\theta^*$ 、调度顺序  $X^*$ 、无人机的悬停位置  $L^*$ 、传输功率  $P^*$  和飞行速度  $V^*$ 。

## 3 仿真结果

为验证本文提出的可充电无人机在数据生命期下调度终端的方法, 本文通过计算机仿真验证所提算法性能。仿真环境参数设置见表 1, 其中参数  $P^h$ 、 $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$ 、 $\psi_4$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$  和  $\tau_4$  的设置与文献[24]一致, 其他参数的设置与文献[30]一致。仿真计算机的具体配置为 Core(TM) i5-8265U CPU@1.60 GHz, RAM 16.0 GB。下面首先对比第 2.4 节提出的随机优选与几种穷举法, 随后观察算法的收敛情况, 最后对比本文调度算法与几种常见的终端调度方案。

表 1 仿真环境参数设置

变量	取值	变量	取值
$B$	2 MHz	$\sigma^2$	-110 dBm
$H$	100 m	$\rho_0$	-60 dB
$R^h$	15 Mbit/s	$P^r$	100 W
$F^{\text{max}}$	100 000 J	$V^{\text{max}}$	25 m/s
$K$	20~80	$D$	1 Gbit/s
$\eta$	4.2	$P^h$	165 W
$[\tau_1, \tau_2]$	$[0.9, 1.6] \times 10^{-4}$	$[\psi_1, \psi_2]$	$[9.3, 16.6] \times 10^{-3}$
$[\tau_3, \tau_4]$	$[1.8, 3.6]$	$[\psi_3, \psi_4]$	$[79.9, 357.2]$
$T^{\text{max}}$	900~3 000 s	终端 $s$	20~90

在验证随机优选算法实验中, 主要基于下列 3 种算法分别产生 100 组权重, 观察不同算法在同一条件、同等实验量下能达到的最优值:

1) “随机优选”为本文第 2.4 节提出的权重优化算法;

2) “网格搜索”为对第 2.4 节中第一、第二和第三影响因子等比例取 3 个权重值, 第四和第五影响因子等比例取 2 个权重值, 将上述权重排列组合得到大约 100 组权重, 实验得到其中最优化重组的终端服务个数和对应优化;

3) “网格迭代”为对第 2.4 节提及的每个影响因子等比例取 10 个权重值, 其中基于前一个影响因子的最优权重进行当前影响因子权重值的实验, 迭代实验两次, 共约 100 组权重。

由于“网格搜索”和“网格迭代”算法的复杂

度随终端数量的增长而呈指数增长,所以为了在合适的复杂度条件下对 3 种算法进行比较,在实验中,终端个数设为 20~90。“随机优选”“网格搜索”和“网格迭代”算法确定权重值优化结果比较见表 2,可以看出“随机优选”算法表现更优。首先,随着请求服务终端数目的增加,基于均值和方差衡量可以发现,在搜索同样数量的权重组数目中,“随机优选”算法下的服务总数最多。其次,“随机优选”算法更为稳定,不存在随着请求终端数目增加出现终端服务数目下滑的情况。最后,纵观全部实验数据,“网格迭代”算法和“网格搜索”算法的服务终端数量均小于“随机优选”算法,表明本文提出的“随机优选”算法具有良好的终端调度性能。

表 2 “随机优选”“网格搜索”和“网格迭代”算法确定权重值优化结果比较

请求服务终端数量/个	50	60	70	80	90	均值	方差
随机优选	15	15	16	16	16	15.6	0.24
网格搜索	14	15	15	16	15	15	0.4
网格迭代	14	11	14	14	15	13.6	1.84

飞行速度与传输功率收敛结果如图 2 所示,展示了存在 50 个请求服务的终端且数据生命周期  $T^{\max}$  为 1 800 s 时,在确定请求服务终端的数量和位置情况下,第 2.5 节算法迭代优化飞行速度和传输功率得到的收敛结果。可以看出,在对优化问题 P5 的迭代优化结果中,随着迭代次数的增加,飞行速度逐步降低,并在迭代次数为 8 之后不再变化,收敛到最优值;传输功率随着迭代次数增加有小幅波动,在迭代次数为 11 之后不再变化,收敛到最优值。

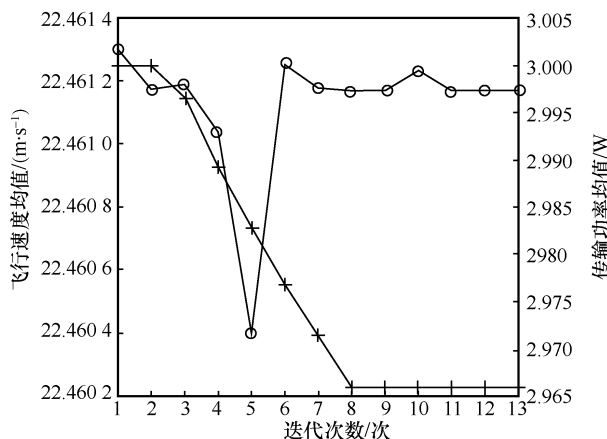


图 2 飞行速度与传输功率收敛结果

接着,对几种不同的终端调度方式进行了实验比较,具体如下。

- 1) 本文算法按本文提出的算法选择无人机要服务的终端。
- 2) 基于距离的算法按请求终端与充电桩的距离选择无人机要服务的终端。
- 3) 基于传输量的算法按请求终端需要传输的信息量选择无人机要服务的终端。
- 4) 基于聚类结果的算法按请求终端在聚类后结合其规模和轮廓因子选择无人机要服务的终端。

不同算法的轨迹对比如图 3 所示,展示了相同条件下,3 种不同策略下的无人机最大服务终端数量和飞行轨迹。在图 3 轨迹中,红色实线代表本文算法可为 15 个终端服务,黑色虚线代表基于距离的算法可服务 11 个终端,蓝色虚线代表基于传输量的算法可服务 11 个终端,可以看出在同等条件下,本文算法可服务更多的终端。从轨迹局部图可看出,本文算法为了达到联合考虑传输量和飞行距离的目的,选择了距离中等但是待传输量不大的终端(如图 3 局部图中的箭头所指终端),从而解决了无人机为服务更近终端而忽视距离较大且传输量更少的终端这一问题。

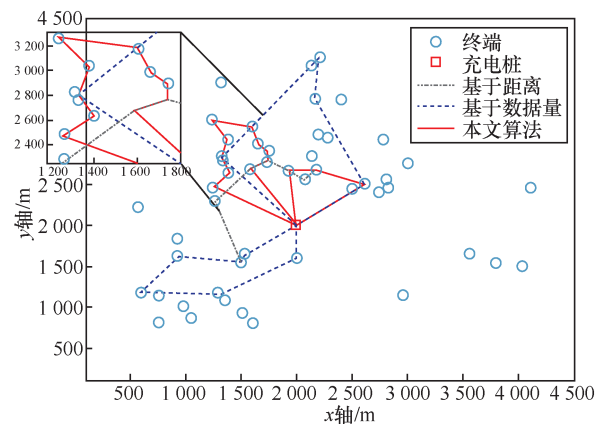


图 3 不同算法的轨迹对比

不同算法的通信数据量对比见表 3,可以看出,本文算法的通信数据量略低于基于数据量的算法,并在请求终端数目较少(30 个)的情况下,通信数据量高于基于距离的算法。这是因为本文算法旨在最大化服务终端的数目,而待传数据量较小的终端在悬停阶段需要的能耗和服务时间更短,更符合本文算法的选择标准。虽然本文算法采集的数据量不及对比算法,但可避免为服务数据量大的终端而消耗过多资源,通过服务时间成本和能耗需求更低的

表3 不同算法的通信数据量对比

请求服务终端数目/个	30		50		80	
数据生命期/s	1 800	2 000	1 800	2 000	1 800	2 000
本文算法的通信数据量/(Gbit·s <sup>-1</sup> )	10.673	11.493	10.827	12.575	11.969	12.938
“基于距离”算法的通信数据量/(Gbit·s <sup>-1</sup> )	13.766	12.141	10.435	12.575	11.068	12.864
“基于数据量”算法的通信数据量/(Gbit·s <sup>-1</sup> )	13.919	13.136	11.124	12.872	12.873	13.16

终端，最大化服务终端数目。结果显示，本文算法在调度中对终端各影响因子进行了综合考虑，兼备靠距离选择终端以达到节能目的的优点，同时考虑了待传数据量和终端分布等实际情况，对复杂的环境有更优的适应能力。

为了进一步评估本文算法在不同场景下的表现，本文设置两种方式以观察与比较本文算法在不同条件下的实用程度。服务终端数量随请求服务终端总数变化仿真如图4所示，当数据生命期 $T^{\max}=3\ 000\text{ s}$ ，可以观察到在此场景下，相较于其他策略，本文算法的优化结果没有明显的抖动现象，即更为稳定；随着请求服务终端数量的增加，本文算法在大部分情况优于其他调度策略。服务终端数量随数据生命期 $T^{\max}$ 变化仿真如图5所示，实验中固定请求服务的终端数量为30，从曲线的增长趋势可以看出， $T^{\max}$ 较小时，距离是影响优化目标的主导因素，随着 $T^{\max}$ 逐渐增大，待传数据量的影响也在逐渐增强。仿真结果验证了在不同 $T^{\max}$ 情况下，相较于其他策略，本文算法平均可多服务接近2个终端，再次表明本文算法调度具有综合考虑的优势，对无人机数据采集的应用有重要作用。

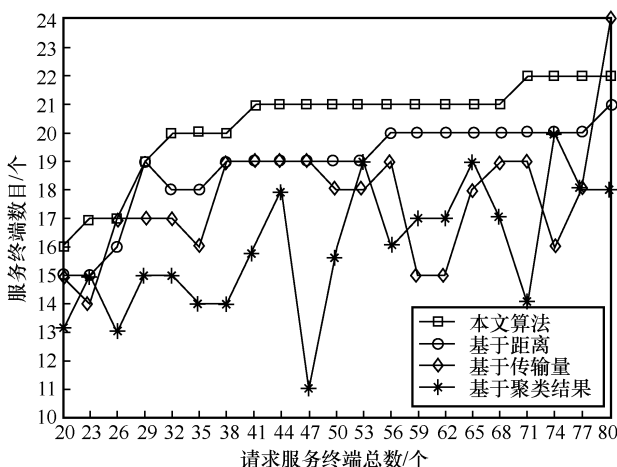


图4 服务终端数量随请求服务终端总数变化仿真

#### 4 结束语

本文研究了使用可充电无人机服务多个地面

终端，采集它们具有生命期数据的场景，提出了一种终端调度与无人机轨迹的优化方法，解决在无人机能耗与终端数据生命期的双重限制下，最大化服务终端数量的问题。为了解决时间成本计算中变量高度耦合的问题，提出了基于随机优化和特征工程的终端调度框架，并引入松弛变量，使用块坐标下降方法联合优化无人机的飞行轨迹、飞行速度和传输功率。仿真结果显示，与其他基准策略相比，本文提出的终端调度框架有着更好的收益，在计算影响因子的权重过程中，以较短的时间获得高质量的次优解。因此，本文为无人机的数据采集应用提出了一种实用新方法。在未来的工作中，有待进一步研究多个无人机进行数据采集的场景以及地面终端处于移动状态的场景。

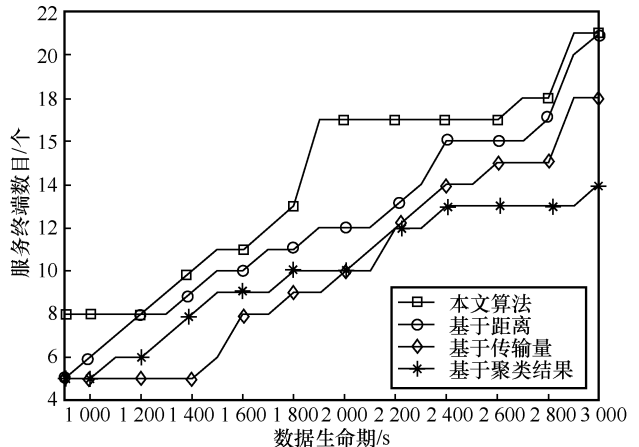


图5 服务终端数量随数据生命期 $T^{\max}$ 变化仿真

#### 参考文献:

- [1] ZENG Y, WU Q Q, ZHANG R. Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12): 2327-2375.
- [2] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: performance and tradeoffs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(6): 3949-3963.
- [3] SHARMA V, SRINIVASAN K, CHAO H C, et al. Intelligent deployment of UAVs in 5G heterogeneous communication environment for improved coverage[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 85: 94-105.

- [4] NAQVI S A R, HASSAN S A, PERVAIZ H, et al. Drone-aided communication as a key enabler for 5G and resilient public safety networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 36-42.
- [5] FAN W L, WU Y, JU S H, et al. Secure UAV communication with robust communication and trajectory design[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [6] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[C]//Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2898-2904.
- [7] MU C X, ZHANG Y. Learning-based robust tracking control of quadrotor with time-varying and coupling uncertainties[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(1): 259-273.
- [8] ZHAN C, ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(3): 328-331.
- [9] YANG D C, WU Q Q, ZENG Y, et al. Energy tradeoff in ground-to-UAV communication via trajectory design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 6721-6726.
- [10] GHDIRI O, JAAFAR W, ALFATTANI S, et al. Energy-efficient multi-UAV data collection for IoT networks with time deadlines[C]//Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [11] ZENG Y, XU X L, ZHANG R. Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2233-2246.
- [12] FAN J Y, CUI M, ZHANG G C, et al. Throughput improvement for multi-hop UAV relaying[J]. IEEE Access, 7: 147732-147742.
- [13] LI J X, ZHAO H T, WANG H J, et al. Joint optimization on trajectory, altitude, velocity, and link scheduling for minimum mission time in UAV-aided data collection[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(2): 1464-1475.
- [14] ZHAN C, HU H, SUI X F, et al. Completion time and energy optimization in the UAV-enabled mobile-edge computing system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(8): 7808-7822.
- [15] YAO J J, ANSARI N. QoS-aware rechargeable UAV trajectory optimization for sensing service[C]//Proceedings of ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [16] YAO J J, ANSARI N. QoS-aware power control in Internet of drones

for data collection service[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6649-6656.

- [17] GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A. Deep learning[M]. Cambridge, MA, USA: MIT press, 2016.

### [作者简介]



李茜雯（1997-），女，广东工业大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为新一代无线通信技术、无人机等。



陈健锋（1998-），男，广东工业大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为新一代无线通信技术、智能反射面等。



崔苗（1978-），女，广东工业大学信息工程学院讲师，主要研究方向为新一代无线通信技术等。



张广驰（1982-），男，广东工业大学信息工程学院教授，主要研究方向为新一代无线通信技术等。