

面向UAV辅助的WSN信息年龄优化算法*

王茜竹, 卢诗萱, 吴广富

重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

摘要: 提出了一种综合传感器能源供给、数据传输时效性和移动用户需求的系统平均信息年龄(AoI)优化算法。首先, 采用无人机(UAV)辅助WSN来保障传感器的能量收集和数据传输。其次, 引入AoI作为衡量指标, 联合优化多设备调度、发射功率和UAV轨迹, 建立了以最小化传感器的平均AoI为目标的非凸优化问题。然后, 通过约束松弛、变量替换和连续凸逼近等方法, 将非凸问题转化为凸问题, 并设计了一种迭代式的平均AoI最小化算法。仿真结果表明: 该算法在满足移动用户体验的同时有效提升了传感器数据新鲜度。

关键词: 无线传感器网络; 无人机; 信息年龄; 能量收集

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)05-0148-08

Age of information optimization algorithm for UAV-assisted WSNs

WANG Qianzhu, LU Shixuan, WU Guangfu

School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: It's proposed that a systematic average age of information optimization algorithm that integrates sensor energy supply, data transmission timeliness, and mobile user requirements. Firstly, an unmanned aerial vehicle assisted WSN is used to secure the energy collection and data transmission from the sensors. Secondly, AoI is introduced as a measure to jointly optimize multi-device scheduling, transmit power and UAV trajectories to establish a non-convex optimization problem with the objective of minimizing the average AoI of the sensors. Then, the non-convex problem is transformed into a convex one by means of constraint relaxation, variable substitution and successive convex approximation, and an iterative average AoI minimization algorithm is designed. Finally, the algorithm is verified through simulation, and the results show that the algorithm effectively improves the freshness of the sensor data while satisfying the mobile user experience.

Key words: wireless sensor networks; unmanned aerial vehicle; age of information; energy harvesting

随着物质文化生活品质的提升, 大型群众活动如体育比赛、文艺演出、展销会的规模和频次逐年增加(王新雨等, 2019)。无线传感器网络(WSN)作为一种环境监测手段, 在这些场景中的

安全预警作用日益凸显。但传统的固定基站部署不灵活且覆盖范围有限, 可能导致感知数据传输任务拥塞进而影响WSN数据传输的时效性。无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)具备快速且灵活

* 收稿日期: 2024-05-09 录用日期: 2024-06-11 网络首发日期: 2024-07-22

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2021jscx-gksbX0050)

作者简介: 王茜竹(1975年生), 女; 研究方向: 移动通信基带算法、多址接入算法;

E-mail: wangqz@cqupt.edu.cn

通信作者: 吴广富(1980年生), 男; 研究方向: 移动通信基带算法、多址接入算法;

E-mail: wugf@cqupt.edu.cn

全文阅读



ZR20240151

部署的特性, 可以作为移动基站为传感器提供能量和信息交互, 解决了基站部署难、通信范围广、数据流量大等问题, 对大型群众活动场景的安全监控发挥重要作用。UAV辅助WSN在水下勘探、作物监测、大气数据采集以及山体滑坡监测等场景广泛应用(Zhou et al., 2022)。

UAV辅助的WSN面临着传感器能量和传输功率受限的问题, 这制约了其进行高频次信息采集和远距离传输的能力(Azarhava et al., 2020)。射频能量收集(RF-EH, radio frequency energy harvesting)技术为解决这一问题提供了可行的方案。利用RF-EH技术, 传感器节点可以接收来自UAV发射的射频能量信号, 将其转化为自身能量以实现持续工作。Wang et al.(2022)提出了一种基于非线性射频能量收集模型的多跳聚类路由协议, 延长了网络生命周期并增强了网络监测性能。进一步地, Pandey et al.(2023)基于多衰落信道环境, 研究了UAV辅助数据采集系统。上述研究重点解决传感器节点的能量供给问题, 增强了传感器网络系统的可靠性和持续性, 但主要以系统吞吐量提升或时延降低为目标, 并未充分考虑WSN监测数据的时效性。

为了更好地评估数据时效性, 研究者引入信息年龄(AoI, age of information)这一概念(Kaul et al., 2012)。Zhang et al.(2020)引入了UAV能耗对平均信息年龄的影响, 通过策略学习进一步优化了飞行轨迹和数据采集策略。在这一基础上, Zhu et al.(2023)通过联合优化悬停点选择和访问顺序, 利用机器学习算法解决了最小化UAV从地面物联网网络采集数据总在线时间的问题。Wu et al.(2022)提出了一种基于人工智能的两阶段方案, 该方案不仅研究了UAV悬停点选择和数据传输时间, 而且在处理更大规模网络时仍保持高效性。在上述基础上, Zhang et al.(2022)基于双延迟深度确定性策略梯度的UAV导航算法, 深入研究了大规模地面传感器场景中的AoI最小化问题。

在UAV辅助的WSN中, 现有工作包括WSN能量补给和监测数据时效性的问题, 但尚未开展兼顾两者的研究。此外, 当前的研究忽略了大型群众活动中急剧增长的移动用户数据对WSN的影响(Wu et al., 2021)。基于此, 本文针对UAV辅助WSN, 系统研究传感器的能量补给、监测数据的时效性和用户通信业务需求等关键问题, 使其更能满足大型群众活动的安全监控需求。

1 系统模型及问题描述

如图1所示, 一架UAV作为移动基站(王茜竹等, 2022)服务于 S 个传感器和 U 个用户。其中, 传感器对现场环境进行安全监测, 用户进行上行数据传输, 定义

$$s \in \{1, 2, \dots, S\},$$

$$u \in \{S+1, S+2, \dots, S+U\},$$

式中 s 和 u 分别表示传感器和用户的序号, $K = S + U$ 表示设备总数。UAV作为基站在所指定的区域内飞行, 以提供传感器所需的能量支持, 并接收传感器安全监测数据和用户上传数据, 确保系统中传感器和用户的通信需求都能得到有效的支持和处理。

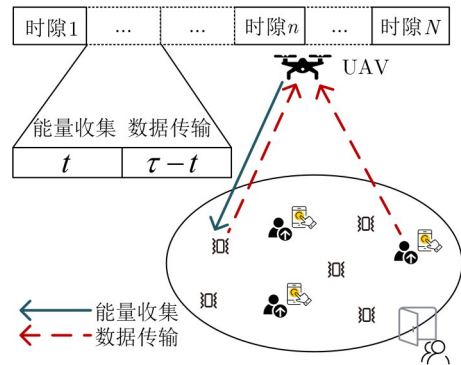


图1 系统模型图

Fig. 1 System model diagram

为避免信息间的干扰, UAV采用时分复用方式(Chen et al., 2023), 将系统时间 $T_s = \tau N$ 划分为长度为 τ 的 N 个时隙, 分时调度 K 个设备。令二元变量 $\alpha_k(n) \in \{0, 1\}$ 为信道分配指示符, 如果时隙 n , 信道被分配给设备 k , 则 $\alpha_k(n) = 1$, 否则 $\alpha_k(n) = 0$, 且有

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k(n) \leq 1, \quad \alpha_k(n) \in \{0, 1\}.$$

不失一般性, 假设 $S_k(n) = (x_k(n), y_k(n))$, $q_v(n) = (x_v(n), y_v(n))$ 分别为设备 k 和UAV在时隙 n 时的水平坐标。考虑UAV的飞行高度和速度受所处地理环境与相关法律法规制约, 假设其飞行高度固定为 h_v 且最大飞行速度为 V_{\max} , 则设备 k 和UAV在时隙 n 的空间位置为 $(x_k(n), y_k(n), 0)$ 和 $(x_v(n), y_v(n), h_v^2)$, UAV需满足最大飞行约束

$$\|q_v(n) - q_v(n-1)\|_2^2 \leq (V_{\max} \tau)^2.$$

由于 UAV 基站移动灵活, 且因为时隙足够短, UAV 与设备在一个时隙内可认为相对静止, 而相邻时隙 UAV 的位置发生变化, 会引发与设备间的动态变化。UAV 与每个设备之间的距离表示为

$$\begin{aligned} d_k(n) &= \sqrt{(x_U(n) - x_k(n))^2 + (y_U(n) - y_k(n))^2 + h_U^2} \\ &= \sqrt{\|q_U(n) - S_k(n)\|_2^2 + h_U^2}. \end{aligned}$$

UAV 与每个设备间的链路视为视距链路, 则路径损耗为

$$g = \xi d^{-\varphi_{\text{LoS}}},$$

其中 d 为 UAV 与设备间的距离, ξ 表示基准距离上的信道功率增益, φ_{LoS} 表示 LoS 链路的路径损耗指数, 该值范围为 $2 \leq \varphi_{\text{LoS}} \leq 5$, 这里取 $\varphi_{\text{LoS}} = 2$ (Xie et al., 2019)。在时隙 n , 传感器 s 、用户 u 到 UAV 间的信道功率增益为

$$\begin{aligned} g_s(n) &= \frac{\xi}{\|q_U(n) - S_s(n)\|_2^2 + h_U^2}, \\ g_u(n) &= \frac{\xi}{\|q_U(n) - S_u(n)\|_2^2 + h_U^2}. \end{aligned}$$

1.1 无线传输模型

鉴于传感器的能量受限问题, 当传感器被调度时, 调度时隙将分成两个阶段, 第一阶段进行能量收集, 时长为 t , 且满足 $0 \leq t \leq \tau$; 第二阶段则利用收集到的能量进行数据传输。

考虑到 UAV 能量有限, UAV 在飞行过程中发射信号的能耗须满足

$$\sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^N \alpha_s(n) t P_s^U(n) \leq E^{\max}, \quad s \in \{1, 2, \dots, S\},$$

其中 $P_s^U(n)$ 为 UAV 在时隙 n 给传感器 s 发射的信号功率, E^{\max} 表示 UAV 整个飞行过程可用来信号发射的最大能耗。

传感器收集来自 UAV 的能量, 并将其用于信息上传。根据线性能量收集模型 (Zhang et al., 2021), 将传感器 s 收集到的能量表示为

$$E_s^{\text{EH}}(n) = \rho \alpha_s(n) t P_s^U(n) g_s(n),$$

其中 ρ 为传感器能量收集效率。

第二阶段, 传感器利用在第一阶段收集的能量向 UAV 上传数据, 设传感器 s 在时隙 n 的发射功率为 $P_s(n)$, 则与收集到的能量之间存在约束

$$\alpha_s(n)(\tau - t)P_s(n) \leq E_s^{\text{EH}}(n).$$

基站接收端的传感器监测信号信噪比 $\gamma_s(n)$ 为

$$\begin{aligned} \gamma_s(n) &= \frac{g_s(n)P_s(n)}{\sigma_0^2 B} \\ &= \frac{\chi P_s(n)}{B(\|q_U(n) - S_s(n)\|_2^2 + h_U^2)}, \end{aligned}$$

其中 B 为带宽, σ_0^2 为高斯白噪声的噪声功率谱密度, $\chi = \xi/\sigma_0^2$ 。

由香农公式可知, 传感器 s 在时隙 n 的实时上行传输速率为

$$\begin{aligned} R_s(n) &= \alpha_s(n) B \log_2(1 + \gamma_s(n)) \\ &= \alpha_s(n) B \log_2 \left(1 + \frac{\chi P_s(n)}{B(\|q_U(n) - S_s(n)\|_2^2 + h_U^2)} \right). \end{aligned}$$

为保证系统数据的完整性和充分性, 促使每个传感器均参与数据传输, 在系统时间内单个传感器上传数据量需满足

$$(\tau - t) \sum_{n=1}^N R_s(n) \geq D_s^{\min},$$

其中 D_s^{\min} 为传感器最小上传门限。

类似地, 当用户 u 在时隙 n 被调度时, 整个时隙长度 τ 进行数据传输, 其传输速率为

$$\begin{aligned} R_u(n) &= \alpha_u(n) B \log_2(1 + \gamma_u(n)) \\ &= \alpha_u(n) B \log_2 \left(1 + \frac{\chi P_u(n)}{B(\|q_U(n) - S_u(n)\|_2^2 + h_U^2)} \right), \end{aligned}$$

其中 $P_u(n)$ 为用户 u 的发射功率, 用户信噪比 $\gamma_u(n)$ 可表示为

$$\begin{aligned} \gamma_u(n) &= \frac{g_u(n)P_u(n)}{\sigma_0^2 B} \\ &= \frac{\chi P_u(n)}{B(\|q_U(n) - S_u(n)\|_2^2 + h_U^2)}. \end{aligned}$$

通信系统不仅要满足用户的数据上传需求, 而且需满足体验需求。每个用户在系统时间内的最小传输数据量要求 (Wang et al., 2020) 为

$$\tau \sum_{n=1}^N R_u(n) \geq D_u^{\min},$$

其中 D_u^{\min} 表示用户最小上传数据量。

1.2 信息年龄模型

AoI 用来度量传感器信息的新鲜程度, 定义为数据包自产生到完成数据更新经历的时间。离散形式下, 传感器 s 在时隙 n 的 AoI 记为 $A_s(n)$, 系统中传感器只保留最新产生的数据包, 数据包的信

息年龄随时间线性增加。传感器在时隙 n 成功传输数据包, 需满足: (1)传感器被调度, 即 $\alpha_s(n) = 1$ 。(2)传感器监测信号信噪比大于或者等于信噪比阈值, 即

$$\gamma_s(n) \geq \alpha_s(n)\gamma_{th}.$$

因此, 两个相邻的时隙AoI的迭代过程如下所示(李新民等, 2022):

$$A_s(n+1) = \begin{cases} 1, & \gamma_s(n) \geq \gamma_{th}; \\ A_s(n) + 1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

为了方便, 将 $A_s(n)$ 表示为

$$A_s(n+1) = A_s(n)(1 - \alpha_s(n)) + 1. \quad (1)$$

1.3 问题描述

定义 $\mathbf{a} \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 为设备调度矩阵, 且

$$\mathbf{a}^T = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_K],$$

其中 $\mathbf{a}_k = [a_k(1), a_k(2), \dots, a_k(N)] \in \mathbb{C}^{1 \times N}$, $\mathbf{P} \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 为 K 个设备、 N 个时隙的发射功率矩阵, 有

$$\mathbf{P}^T = [\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_K],$$

$$\mathbf{P}_k = [P_k(1), P_k(2), \dots, P_k(N)] \in \mathbb{C}^{1 \times N}.$$

无人机的飞行轨迹近似为序列(Abd-Elmagid et al., 2019; Liu et al., 2021):

$$\mathbf{Q} = \{q_U(1), q_U(2), q_U(3), \dots, q_U(N)\}.$$

为最小化传感器信息的长期平均AoI, 在 $[1, N]$ 时隙联合优化 K 个设备的调度矩阵、发射功率矩阵以及无人机的飞行轨迹, 优化问题可以表述为

$$\min_{\mathbf{a}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}} \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S A_s(n)}{NS}, \quad (2)$$

s.t.

$$\text{C1: } \sum_{k=1}^K \alpha_k(n) \leq 1,$$

$$\text{C2: } \alpha_k(n) \in \{0, 1\},$$

$$\text{C3: } \sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^N \alpha_s(n) t P_s^U(n) \leq E^{\max},$$

$$\text{C4: } \alpha_s(n)(\tau - t)P_s(n) \leq E_s^{EH}(n),$$

$$\text{C5: } \gamma_s(n) \geq \gamma_{th},$$

$$\text{C6: } \tau \sum_{n=1}^N R_u(n) \geq D_u^{\min},$$

$$\text{C7: } (\tau - t) \sum_{n=1}^N R_s(n) \geq D_s^{\min},$$

$$\text{C8: } \|q_U(n) - q_U(n-1)\|_2^2 \leq (V_{\max} \tau)^2,$$

其中C1和C2为调度分配约束, C3为UAV发射功率约束, C4为传感器能量收集约束, C5为信噪比约束, C6和C7分别为用户和传感器上传数据量约束, C8为UAV移动性约束。式(2)中优化变量 $\alpha_k(n) \in \{0, 1\}$ 为整形变量, 且约束条件中存在耦合变量 $a_k(n)$ 和 $P_k(n)$ 。另外, C6、C7中 $R_u(n)$, $R_s(n)$ 关于UAV的位置 $q_U(n)$ 是个非凸函数, 因此难以直接求解该优化问题。

2 问题求解

2.1 优化设备调度与发射功率

算法的子问题一为优化设备调度与发射功率。首先, 给定UAV轨迹 \mathbf{Q} , 对设备调度参数 \mathbf{a} 和发射功率 \mathbf{P} 进行优化。为了解决整形约束问题, 将条件式C2中的01整形变量 $\alpha_k(n) \in \{0, 1\}$ 松弛成一个连续变量 $0 \leq \alpha_k(n) \leq 1$, 此时子问题一可描述为

$$\min_{\mathbf{a}, \mathbf{P}} \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S A_s(n)}{NS}, \quad (3)$$

s.t.

$$\text{C1, C3, C4, C5, C6,}$$

$$\text{C2': } 0 \leq \alpha_k(n) \leq 1.$$

设备 k 被调度时 $\alpha_k(n) \neq 0$, $a_k(n)$ 和 $P_k(n)$ 两变量耦合, 导致式(3)问题非凸。为解决这个问题, 利用变量替换法, 引入辅助变量 $\overline{P_k(n)} = \alpha_k(n)P_k(n)$, 通过透视函数的齐次性, 将原始约束条件C6中的 $R_u(n)$ 改写为

$$\overline{R_u(n)} = \alpha_u(n)B$$

$$\times \log_2 \left[1 + \frac{\chi \overline{P_u(n)}}{B \alpha_u(n) (\|q_U(n) - S_u(n)\|_2^2 + h_U^2)} \right].$$

同理, C7中的 $R_s(n)$ 改写为

$$\overline{R_s(n)} = \alpha_s(n)B$$

$$\times \log_2 \left[1 + \frac{\chi \overline{P_s(n)}}{B \alpha_s(n) (\|q_U(n) - S_s(n)\|_2^2 + h_U^2)} \right].$$

这使得约束条件可以表示为凸函数, 可以得到以下凸问题:

$$\min_{\mathbf{a}, \mathbf{P}} \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S A_s(n)}{NS}, \quad (4)$$

s.t.

C1, C3,

C2': $0 \leq \alpha_k(n) \leq 1$, $\overline{C4}$: $(\tau - t) \overline{P_s(n)} \leq E_s^{EH}(n)$, $\overline{C5}$: $\overline{\gamma_s(n)} \geq \alpha_s(n) \gamma_{th}$, $\overline{C6}$: $\tau \sum_{n=1}^N \overline{R_u(n)} \geq D_u^{\min}$, $\overline{C7}$: $(\tau - t) \sum_{n=1}^N \overline{R_s(n)} \geq D_s^{\min}$,

其中

$$\overline{\gamma_s(n)} = \frac{\chi \overline{P_s(n)}}{B(\|q_U(n) - S_s(n)\|_2^2 + h_U^2)}$$

公式(4)是个凸优化问题, 可以用凸优化工具进行求解, 可得当前最优的设备调度方式 \mathbf{a}^* 和发射功率 \mathbf{P}^* 。

2.2 优化 UAV 轨迹

算法的子问题二为根据设备调度 \mathbf{a}^* 与发射功率 \mathbf{P}^* 的值优化 UAV 轨迹 \mathbf{Q} :

$$\min_{\mathbf{Q}} \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S A_s(n)}{NS}, \quad (5)$$

s.t. C4, C5, C6, C7, C8,

式(5)中约束 C6、C7 的 $R_u(n)$ 和 $R_s(n)$ 关于 UAV 的位置 $q_U(n)$ 是个非凸函数。为了解决非凸性, 采用连续凸逼近方法对 $R_s(n)$ 和 $R_u(n)$ 做近似凸处理。

通过一阶泰勒近似可以获得 $R_s(n)$ 、 $R_u(n)$ 的下界 $R_s^q(n)$ 和 $R_u^q(n)$:

$$R_s^q(n) = \alpha_s(n) B \log_2 \left(1 + \frac{\chi P_s(n)}{B d_s^m(n)} \right) - \alpha_s(n) B \chi P_s(n)$$

$$\times \frac{\|q_U(n) - S_s(n)\|_2^2 - \|q_U^m(n) - S_s(n)\|_2^2}{\ln 2 [B d_s^m(n) + \chi P_s(n)] d_s^m(n)},$$

$$R_u^q(n) = \alpha_u(n) B \log_2 \left(1 + \frac{\chi P_u(n)}{B d_u^m(n)} \right) - \alpha_u(n) B \chi P_u(n)$$

$$\times \frac{\|q_U(n) - S_u(n)\|_2^2 - \|q_U^m(n) - S_u(n)\|_2^2}{\ln 2 [B d_u^m(n) + \chi P_u(n)] d_u^m(n)},$$

其中

$$d_s^m(n) = \|q_U^m(n) - S_s(n)\|_2^2 + h_U^2,$$

$$d_u^m(n) = \|q_U^m(n) - S_u(n)\|_2^2 + h_U^2.$$

问题(4)可以近似为

$$\min_{\mathbf{Q}} \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S A_s(n)}{NS}, \quad (6)$$

s.t.

C4, C5, C8,

C6': $\tau \sum_{n=1}^N R_u^q(n) \geq D_u^{\min}$,C7': $(\tau - t) \sum_{n=1}^N R_s^q(n) \geq D_s^{\min}$.

此时的式(6)是一个凸优化问题, 可以利用现有的凸优化工具包来解决, 获得当前 UAV 轨迹的局部最优解 \mathbf{Q}^* 。

2.3 求解算法

为了有效解决这个混合整数非凸问题, 本文利用交替优化将其分解为两个子问题, 设计了一种基于迭代的平均 AoI 最小化算法。所提算法根据应用环境进行参数初始化, 设置最大迭代次数和内层迭代次数, 首先通过固定优化变量 \mathbf{Q} , 求解式(4), 得到最优的设备调度方式 \mathbf{a}^* 和发射功率 \mathbf{P}^* 。然后, 基于最优变量 \mathbf{a}^* 、 \mathbf{P}^* 求解式(6), 得到最优无人机轨迹 \mathbf{Q}^* , 更新迭代次数, 直到内层迭代次数等于最大迭代次数, 停止迭代, 获得当前最大迭代次数下的最优结果。具体步骤如表 1 所示。

表 1 基于迭代的 AoI 最小化算法

Table 1 Iterative-based AoI minimization algorithm

初始化系统参数: h_U , V_{\max} , B , t , D_s^{\min} , D_u^{\min} 等; 初始化迭代次数 $l=0$; 设置最大迭代次数 i ; 固定优化变量 \mathbf{Q}
(1) While $l < i$ do
(2) 根据当前的 \mathbf{Q} 对式(4)进行求解, 得到设备调度方式 \mathbf{a}^* 和发射功率 \mathbf{P}^* ;
(3) 更新 $\{\mathbf{a}, \mathbf{P}\}$, $\mathbf{a}=\mathbf{a}^*$, $\mathbf{P}=\mathbf{P}^*$;
(4) 根据 $\{\mathbf{a}, \mathbf{P}\}$ 对式(6)进行求解, 得到无人机轨迹 \mathbf{Q}^* ;
(5) 更新 $\{\mathbf{Q}\}$, $\mathbf{Q}=\mathbf{Q}^*$;
(6) 根据式(1)更新 $A_s(n+1)$;
(7) 迭代次数更新 $l=l+1$
(8) if $l=i$
break

3 仿真结果与分析

本文在 Matlab 仿真平台进行实验来证明所提算法的有效性。仿真环境设置为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的方形区域, 有多个传感器和用户随机分布在该区域

中。一架 UAV 为用户和传感器进行服务, UAV 初始位置为(0,0), 飞行高度 $h_U = 10$ m, 最大飞行速度 $V_{\max} = 100$ m/s。信道带宽 $B = 100$ MHz, 单位时隙长度 $\tau = 0.01$ s, 传感器能量收集时间 $t = 0.005$ s, 传感器能量收集效率 $\rho = 0.8$ 。其他仿真参数: $\xi = 20$, $\sigma_0^2 = -70$ dBm, $D_s^{\min} = 1$ M, $D_u^{\min} = 2$ M。

图 2 为 $S = 10, U = 6$, 时隙数目 $N = 38$ 时, 本文算法下 UAV 飞行轨迹。通过观察可知, 在调度传感器的时隙, UAV 呈现向外扩张的趋势, 这种趋势有助于 UAV 靠近传感器, 从而在传输环境中降低干扰的程度。且在相同条件下, 随着迭代次数的增加, 算法逐渐收敛到更优解的方向, 靠近传感器的趋势变得更加显著。这种收敛性有助于优化 UAV 的飞行路径, 更有效地服务于被调度的传感器。

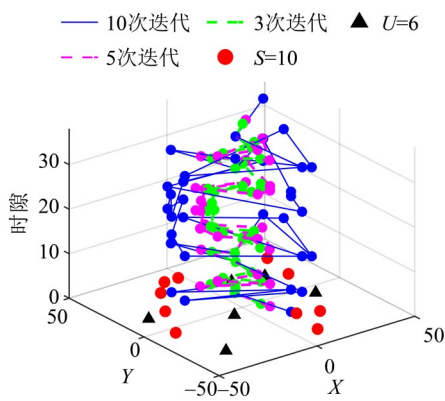


图 2 UAV 飞行轨迹
Fig. 2 UAV flight trajectory

图 3 给出了三种不同算法系统 AoI 随时间的演变情况。相较于循环调度 (Alhaidari et al., 2019; Sakshi et al., 2022) 和随机调度 (Li et al., 2015), 本文所提出的算法系统 AoI 性能更加优异。这是因为本文算法首先满足了信道和能量条件, 保证被调度传感器能够成功发送和接收, 进而最小化传感器的平均 AoI。

随机调度可能会导致某些设备频繁被选择, 而其他设备很少参与调度, 不均匀的信息更新频率导致系统整体 AoI 增加。而循环调度算法相对于随机调度在任务调度中展现出更高效特性, 这是因为循环调度算法按照一定的顺序执行任务, 确保每个任务都有机会执行, 并且循环调度算法能够保证调度的公平性, 通过周期性地执行各项任务, 避免了某些任务长期被忽视的情况, 使得

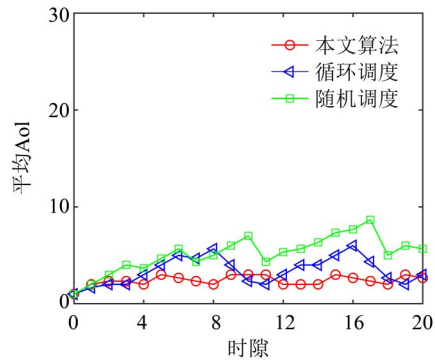


图 3 不同算法性能比较

Fig. 3 Performance comparison of different algorithms

资源分配更加公正。然而, 与文本算法相比, 循环调度算法虽然能够保证调度的公平性, 但由于没有考虑信噪比和能量阈值, 可能导致调度失败, 从而增加平均 AoI。相比之下, 本文算法不仅考虑了这些因素, 还确保了资源分配的公平性。与循环调度算法比较, 本文算法使 AoI 减少 50% 左右; 与随机调度算法比较, 本文算法使 AoI 下降了 70% 左右。

图 4 给出了三种算法下 UAV 发射功率与平均 AoI 的关系。结果显示, 平均 AoI 随 UAV 发射功率的增加而减小, 即呈负相关。其原因是随着 UAV 发射功率的增加, 能量收集阶段传感器功率增加, 数据传输时传感器满足能量和 SNR 阈值的时隙增多, 从而降低了平均 AoI。

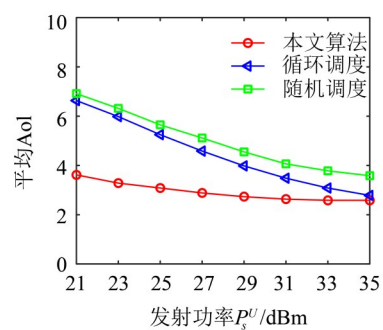


图 4 UAV 发射功率与平均 AoI 在不同算法下的关系

Fig. 4 UAV transmit power versus average AoI under different algorithms

图 5 展示了活跃用户数与平均 AoI 的关系, 活跃用户数越多, 传感器平均 AoI 越大。这是因为活跃用户增多, 需要满足的总用户上传数据量增大。因此, 调度传感器的时隙数相对减少, 进而信息新鲜度变差。

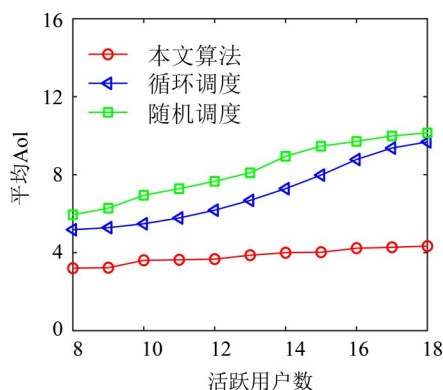


图5 活跃用户数与平均AoI在不同算法下的关系

Fig. 5 Relationship between the number of active users and average AoI under different algorithms

通过图4~5对比三种算法,在固定UAV发射功率或者活跃用户数时,本文算法能够有效降低平均AoI。值得注意的是,本文算法的AoI受UAV发射功率和用户接入数量的影响较小,结果更加稳定,为WSN与UAV联合工作提供了更可靠的优化方案。

图6给出了本文算法下信噪比阈值与传感器数目对平均AoI的影响。随着信噪比阈值的增加,系统的平均AoI也随之增加。这是因为较高的阈值意味着较少的时隙传感器能够满足该阈值条件,这导致系统中传感器有效参与调度的时隙减少,从而导致平均AoI的增加。同时,在相同的信噪比阈值条件下,传感器数量越多,系统的平均AoI越高。这是因为增加传感器数量,传感器间的调度竞争更加激烈,一些传感器竞争不足影响信息更

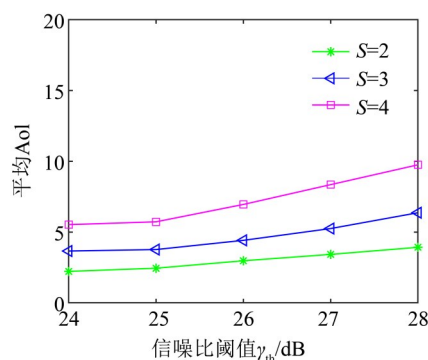


图6 信噪比阈值和传感器个数对平均AoI的影响

Fig. 6 Effect of SNR threshold and number of sensors on average AoI

新频率,进而影响整体平均AoI。

4 结 语

本文提出了一种UAV辅助的WSN信息年龄优化算法。该算法以最小化场景内所有传感器的平均信息年龄(AoI)为目标,在考虑用户上传信息需求、UAV能量、阈值、上传数据量等约束条件的基础上,建立了一个复杂的混合整数非凸优化问题。为有效解决此问题,本文采用交替优化方法将原非凸优化问题分解为资源分配子问题和UAV轨迹子问题,采用变量替换和连续凸逼近方法进行求解。仿真试验表明,本文所提出的算法兼顾移动用户通信需求和传感器数据时效性,在大型活动的安全监测与保障方面展现出了更为可行和高效的方案。

参考文献:

- 李新民,尹宝林,魏李莉,等,2022.强化学习无人机通信系统中的信息年龄优化[J].电子科技大学学报,51(2):213-218.
- 王茜竹,胡洪瑞,徐勇军,等,2022.基于能量收集的UAV-D2D网络资源分配算法[J].电子与信息学报,44(3):976-986.
- 王新雨,汪驰升,2019.基于深度学习的密集人群安全监测系统[J].物联网技术,9(11):8-12+17.
- ABD-ELMAGID M A, DHILLON H S, 2019. Average peak age-of-information minimization in UAV-assisted IoT networks [J]. IEEE Trans Veh Technol, 68(2): 2003-2008.
- ALHAIDARI F, BALHARITH T, AL-YAHYAN E, 2019. Comparative analysis for task scheduling algorithms on

cloud computing [C]//International Conference on Computer and Information Sciences.

- AZARHAVA H, MUSEVI J, 2020. Energy efficient resource allocation in wireless energy harvesting sensor networks [J]. IEEE Wirel Commun Lett, 9(7): 1000-1003.

- CHEN G, WU Q, CHEN W, et al, 2023. IRS-aided wireless powered MEC systems: TDMA or NOMA for computation offloading? [J]. IEEE Trans Wirel Commun, 22(2): 1201-1218.

- KAUL S, YATES R, GRUTESER M, 2012. Real-time status: How often should one update? [C]// IEEE Infocom. Orlando, FL, USA:IEEE: 2731-2735.

- LIU J, TONG P, WANG X, et al, 2021. UAV-aided data collection for information freshness in wireless sensor

- networks[J]. IEEE Trans Wirel Commun, 20(4): 2368–2382.
- LI K, TANG X, VEERAVALLI B, et al, 2015. Scheduling precedence constrained stochastic tasks on heterogeneous cluster systems[J]. IEEE Trans Comput, 64(1): 191–204.
- PANDEY G K, GURJAR D S, YADAV S, et al, 2023. UAV-empowered IoT network with hardware impairments and shadowing[J]. IEEE Sens Lett, 7(7): 1–4.
- SAKSHI, CHETAN S, SHAMNEESH S, et al, 2022. A new median-average round Robin scheduling algorithm: An optimal approach for reducing turnaround and waiting time[J]. Alex Eng J, 61(12): 10527–10538.
- WANG B J, ZHANG R Q, CHEN C, et al, 2020. Graph-based file dispatching protocol with D2D-enhanced UAV-NOMA communications in large-scale networks [J]. IEEE Internet Things J, 7(9): 8615–8630.
- WANG J, GE Y, 2022. A radio frequency energy harvesting-based multihop clustering routing protocol for cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Sens J, 22(7): 7142–7156.
- WU F, YANG S, ZHENG Z, et al, 2021. Fine-grained user profiling for personalized task matching in mobile crowdsensing[J]. IEEE Trans Mobile Comput, 20(10): 2961–2976.
- WU T H, LIU J F, LIU J, et al, 2022. A novel AI-based framework for AoI-optimal trajectory planning in UAV-assisted wireless sensor networks [J]. IEEE Trans Wirel Commun, 21(4): 2462–2475.
- XIE L, XU J, ZHANG R, 2019. Throughput maximization for UAV-enabled wireless powered communication networks[J]. IEEE Internet Things J, 6(2): 1690–1703.
- ZHANG G, SHEN C, SHI Q, et al, 2023. AoI minimization for WSN data collection with periodic updating scheme [J]. IEEE Trans Wirel Commun, 22(1): 32–46.
- ZHANG J, ZHANG Y, XIANG L, et al, 2021. Robust energy-efficient transmission for wireless-powered D2D communication networks [J]. IEEE Trans Veh Tech, 70(8): 7951–7965.
- ZHANG J, KANG K, YANG M, et al, 2022. AoI-minimization in UAV-assisted IoT network with massive devices [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Austin, TX, USA: IEEE: 1290–1295.
- ZHANG S, ZHANG H, HAN Z, et al, 2020. Age of information in a cellular internet of UAVs: Sensing and communication trade-off design [J]. IEEE Trans Wirel Commun, 19(10): 6578–6592.
- ZHOU M, CHEN H, SHU L, et al, 2022. UAV-assisted sleep scheduling algorithm for energy-efficient data collection in agricultural internet of things [J]. IEEE Internet Things J, 9(13): 11043–11056.
- ZHU B, BEDEER E, NGUYEN H H, et al, 2023. UAV trajectory planning for AoI-minimal data collection in UAV-aided IoT networks by transformer[J]. IEEE Trans Wirel Commun, 22(2): 1343–1358.

(责任编辑 王海蓉)