

应急场景下基于 PAoI 的多无人机数据收集策略

盛少杰¹, 解志斌^{1†}, 宋科宁²

(1. 江苏科技大学海洋学院, 江苏 镇江 212003; 2. 中国人民解放军 95829 部队 432100)

摘要:为了解决应急场景下数据新鲜程度极为敏感的问题,提出了一种基于峰值信息年龄(Peak Age of information, PAoI)的多无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)数据收集策略。在该策略中,将目标函数 PAoI 定义为全局的数据收集时间、传输时间以及前往数据传输点的飞行时间三者之和,并提出一种联合 UAV 任务分配、飞行速度和传输速率的优化算法来最小化目标函数 PAoI。针对问题和约束的非凸性质,根据坐标下降法原理将问题分解为三个子问题。首先,基于亲和力传播聚类(Affinity Propagation, AP)和蚁群算法实现 UAV 的最优任务分配。其次,通过引入不同的松弛变量并基于连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)算法将非凸问题变凸,优化 UAV 的飞行速度和传输速率。最后,给出了三个子问题交替迭代的联合优化算法,实现 PAoI 的最小化。实验结果验证了所提算法在减少全局 PAoI 的有效性,表明所提策略适合对数据新鲜程度有严格要求的应急通信场景。

关键词:无人机;应急通信;峰值信息年龄;数据收集

中图分类号:TN92

文献标识码:A

Multi-UAV Data Collection Strategy Based on PAoI in Emergency Scenarios

SHENG Shaojie¹, XIE Zhibin^{1†}, SONG Kening²

(1. Ocean College, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China;

2. PLA 95829 432100, China)

Abstract: To address the issue of highly sensitive information freshness in emergency scenarios, this paper proposes a multi-unmanned aerial vehicle (UAV) data collection strategy based on the peak age of information (PAoI). In this system, the objective function PAoI is defined as the sum of global data collection time, transmission time, and the flight time to the data transmission point. A joint optimization algorithm for UAV task allocation, flight speed, and transmission rate is introduced to minimize the objective function PAoI. Given the non-convex nature of the problem and constraints, the coordinate descent method is employed to decompose the problem into three sub-problems. Firstly, optimal UAV task allocation is achieved through affinity propagation clustering and ant colony optimization. Secondly, by introducing different relaxation variables and utilizing a successive convex approximation algorithm, the non-convex problem is transformed into a convex one for optimizing UAV flight speed and transmission rate. Finally, a joint optimization algorithm with alternating iterations for the three sub-problems is presented to minimize PAoI. Experimental results validate the effectiveness of the proposed algorithm in reducing global PAoI, indicating the suitability of the proposed strategy for emergency communication scenarios with stringent requirements on data freshness.

Key words: UAV; emergency communication; PAoI; data collection

收稿日期:2024-03-20

基金项目:高端外国专家引进计划资助项目(G2023014110);国家自然科学基金资助项目(62276117)

作者简介:盛少杰(2000—),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向:无人机辅助通信,信息新鲜度。

† 通信联系人, E-mail: xiezhibin@just.edu.cn

随着大数据和移动边缘计算的发展,今天的移动应用对时延变得更加敏感。而 UAV 作为优秀的空中载体,以低成本、高移动性的方式支持无线通信,并为建立新的专用空对地通信链路提供了可能^[1-2],被广泛应用于军事、救灾、医疗和无线传感器网络等领域^[3]。UAV 尤其适用于辅助应急通信领域,在发生洪水、地震等应急场景下,可以灵活部署 UAV 的通信节点,以减少灾害损失^[4]。

为了实现数据收集的目的,基于不同优化目标的 UAV 辅助无线通信问题研究层出不穷,现有的大部分工作集中在收集时间、节能覆盖和资源分配上^[5-7]。文献[5]在 UAV 辅助无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)的数据收集场景中,针对 UAV 飞行状态下和悬停状态下收集时间进行数学分析,提出飞行轨迹与收集轨迹联合优化算法来最小化数据收集时间。文献[6]研究了应急场景下中继选择和飞行轨迹对通信能量和飞行能量的影响,提出基于 SCA 和禁忌搜索的迭代算法实现系统能量效率最大化。文献[7]探讨了非正交多址(Non-orthogonal Multiple Access, NOMA)辅助多无人机实现应急用户聚类 and 三维位置规划问题,并基于均匀信道增益差和粒子群优化算法实现系统求和率最大。除此以外,信息的时效性也被认为是数据收集的一项重要指标,尤其在应急场景下的数据监测、检测信息和救援信息等,数据的新鲜程度就显得更为重要。为了衡量数据的新鲜程度,文献[8]提出了信息年龄(Age of Information, AoI)的概念。文献[9]中进一步引入了 PAoI,它衡量了 AoI 的最坏情况,与 AoI 具有正相关性。文献[10]针对 WSNs 下的 UAV 辅助数据收集问题,提出了基于树搜索算法的优化算法来实现 AoI 最小化。文献[11]研究了 UAV 辅助 WSNs 中的平均 AoI 和 PAoI 最小化问题,并基于聚类算法和神经轨迹求解器提出一种端到端的 AI 优化框架。考虑到 UAV 作为一种空中载体能耗的影响是至关重要的,而文献[10-11]在提供有效解决方法时却忽略了能耗的影响。文献[12]在 UAV 辅助物联网通信的场景中考虑了能耗的影响,并基于 Transformer 模型和路径搜索算法解决了最小化 PAoI 问题。考虑到 UAV 能量有限,单架 UAV 通常无法完成整个场景下用户的数据收集,文献[13-14]为了解决这个问题,采用多 UAV 辅助数据收集来实现 AoI 最小化。文献[15]研究了在 WSNs 中的多 UAV 往返辅助数据收集的问题,提出基于 AP 算法、K-means 聚类和

蚁群的迭代算法解决了 AoI 最小化问题。然而,上述文献^[10-15]中的最小化 AoI 问题都是求遍历所有用户的最小飞行路径,这种方法通常会导致第一个用户的 AoI 等于从上传数据时刻到完成整个任务时刻的时间,从而使得任务前后用户数据 AoI 差距较大,特别是在数据包大、收集区域大、用户发射功率小的情况下会更明显。

针对上述研究现状,提出一种应急场景下基于 PAoI 的多 UAV 数据收集策略,来收集监测区域用户的数据并保证数据的新鲜程度。在该策略中,将目标函数 PAoI 定义为全局的数据收集时间、传输时间以及前往数据传输的飞行时间三者之和,并提出一种联合 UAV 任务分配、飞行速度和传输速率的优化算法来最小化目标函数 PAoI。针对问题和约束的非凸性质,根据坐标下降法原理将问题分解为三个子问题。首先,基于 AP 算法将区域用户进行聚类从而获得数据收集点位置,并通过蚁群算法实现 UAV 的最优任务分配。其次,通过引入不同的松弛变量并基于 SCA 分别优化 UAV 的飞行速度和传输速率,最后给出三个子问题交替迭代的联合优化算法,获得满足 KKT 条件的局部最优解,实现了全局的 PAoI 最小化。通过数值仿真结果分析,验证了本文算法的有效性,表明本文所提出的策略能满足对数据新鲜程度有严格要求的应急通信场景。

1 系统模型

1.1 系统模型

本文系统模型由一个数据中心 c_0 , K 个 UAV 和 M 个用户组成。UAV 在数据收集点(Collection Point, CP)收集数据,UAV 集合表示为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_K\}$,用户集合表示为 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_M\}$, L 个 CP 集合表示为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_L\}$ 。为了方便表达,令第 l 个 CP 表示为 $\tilde{q}_l$,第 l 个数据传输点表示为 $\tilde{p}_l$ 。如图 1 所示,UAV 被派往一个灾害区域,飞行高度为 H_u ,从数据中心 c_0 出发,根据 PAoI 最小化准则收集目标 CP 中计划用户的数据信息,再飞往合适的数据传输点 P 传输数据,直至收集并传输完所有 CP 数据后返回数据中心 c_0 。

根据文献[16]可知,在 UAV 收集监测区域数据过程中,用户可以随时生成待上传的数据。假设一个用户只属于一个 CP,表示为 λ 。如果第 m 个用户与第 l 个 CP 关联,则 $\lambda_{m,l} = 1$,否则 $\lambda_{m,l} = 0$ 。第 l 个 CP 所关联的用户集合表示为 $B_l = \{b_m \mid$

$\lambda_{m,l} = 1, b_m \in B\}$ 。

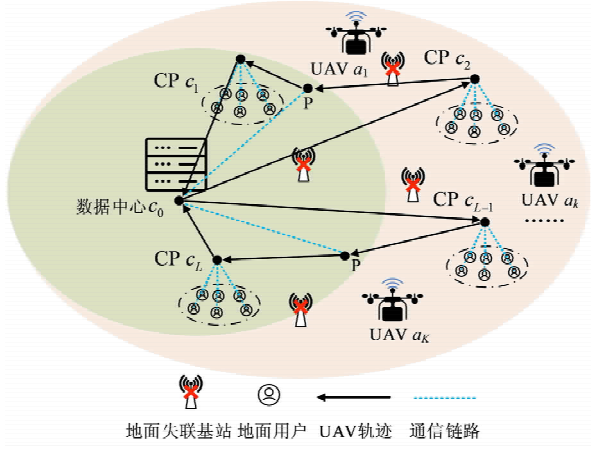


图 1 系统模型

1.2 传输模型

考虑到 UAV 在飞行时可能会因传输不稳定引起丢包,从而导致 AoI 恶化。因此,本文以 UAV 悬停位置为研究对象,信道增益^[17]为 $h_{m,l} = P_{m,l}^{\text{LoS}} \beta_0 (d_{m,l})^{-\alpha} + (1 - P_{m,l}^{\text{LoS}}) \kappa \beta_0 (d_{m,l})^{-\alpha}$ 。其中 β_0 为参考距离为 1 m 时的信道功率增益, κ 表示由于信道 NLOS 条件而产生的额外衰减因子。 $d_{m,l} = \sqrt{(x_l - x_m)^2 + (y_l - y_m)^2 + H_u^2}$ 为第 l 个 CP 与第 m 个用户之间的距离。 $P_{m,l}^{\text{LoS}} = 1 / \{1 + \text{aexp}[-b(\theta_{m,l} - a)]\}$ 表示用户和 UAV 之间的中断概率, a 和 b 是与环境相关的两个常量, $\theta_{m,l} = 180 / \pi \sin^{-1}(H_u / d_{m,l})$ 表示 UAV 与用户通信时的仰角。则该 UAV 与第 m 个用户间的传输速率为:

$$R_{m,l} = B \log_2 (1 + h_{m,l} P_m \beta_0 / \sigma^2) \quad (1)$$

式中, B 为系统带宽, σ^2 为接收机处的噪声功率, P_m 为用户传输功率。假设该场景下所有用户都采用时分多址,生成的数据包大小为 w_m ,则用户的上传时间为 $\zeta_{m,l} = w_m / R_{m,l}$ 。同理可得数据传输点 UAV 传输速率 $R_{\hat{p}_l, c_0} = B \log_2 (1 + h_{\hat{p}_l, c_0} P_u B_0 / (\sigma^2 \Gamma))$ 。其中 Γ 表示因实际调制和编码方案而导致的信噪比间隙, P_u 为 UAV 的传输功率。则传输速率 $\zeta_{\hat{p}_l, c_0} = |B_l| w_m / R_{\hat{p}_l, c_0}$ 。另外,在进行数据传输时, UAV 和数据中心 c_0 之间的信号可能非常弱,为保证数据传输完整,距离应该满足 $d_{\hat{p}_l, c_0} \leq d_{\max}, l = 1, \dots, L$, 其中 $d_{\max}$ 为满足最小信噪比要求的 UAV 和数据中心 c_0 之间的最大距离。

2 问题描述

2.1 信息年龄与能耗计算

UAV 的任务时间序列如图 2 所示, CP 集合

$C_k[n] = [c_{k,1}, c_{k,2}, c_{k,3}, \dots, c_{k,|C_k[n]|}]$ 。如果第 m 个用户是第 k 个 UAV 任务中第 l 个 CP 中的第 j 个计划用户,则目标函数全局 PAoI 可表达为:

$$\Gamma_p^k = \sum_{l=1}^{|C_k[n]|} (t_{c,l}^k + t_{F_2,l}^k + t_{s,l}^k) = \sum_{l=1}^{|C_k[n]|} \left(\sum_{j=1}^{|B_l|} \zeta_{j,l} + \frac{d_{q_l, \hat{p}_l}^k}{v_l^k} + \frac{|B_l| w_m}{R_{\hat{p}_l, c_0}^k} \right) \quad (2)$$

其中, v_l^k 表示当前 CP 飞往数据传输点的速度。根据文献[18],加速和减速所造成的能量消耗可以忽略。因此, UAV 推进功率消耗模型可建立如下:

$$P(v) = P_0 \left(1 + \frac{3v^2}{U_{\text{tip}}^2} \right) + P_1 \left(\sqrt{1 + \frac{v^4}{4v_0^4}} - \frac{v^2}{2v_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} d_0 \rho s_0 A_{\text{disc}} v^3 \quad (3)$$

式中, v 表示 UAV 的飞行速度, P_0 和 P_1 分别表示 UAV 在悬停状态下时叶片轮廓功率和诱导功率; U_{tip} 表示 UAV 旋翼叶片的叶尖速度; v_0 表示 UAV 悬停时的平均旋翼诱导速度; d_0 和 s_0 分别表示 UAV 机身阻力比和旋翼坚固度, ρ 和 A_{disc} 分别表示空气密度和旋翼盘面积。由图 2 所示,可将 UAV 能耗分为悬停能耗和飞行能耗,则第 k 个 UAV 能耗如下:

$$E_p^k = (P_0 + P_1) \left(\sum_{l=1}^{|C_k[n]|} \sum_{j=1}^{|B_l|} \zeta_{j,l} + \frac{|B_l| w_m}{R_{\hat{p}_l, c_0}^k} \right) + \sum_{l=1}^{|C_k[n]|} \frac{P(v_l^k) d_{q_l, \hat{p}_l}^k}{v_l^k} + P(V_k) \times \left(\sum_{l=1}^{|C_k[n]|-1} \frac{d_{\hat{p}_l, \hat{q}_{l+1}}^k}{V_k} + t_{c_0, \hat{q}_1}^k + t_{\hat{p}, |C_k[n]|, c_0}^k \right) \quad (4)$$

其中, V_k 表示 UAV 的初始速度。

2.2 优化问题描述

本文联合优化 UAV 任务分配 W 、飞行速度 V 以及传输速率 R , 最小化全局 PAoI。问题表述为:

$$\min_{W, V, R} \Gamma_p^k \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad E_p^k \leq E_{\text{limit}}, \quad k \in A \quad (5a)$$

$$0 \leq v_l^k \leq v_{\max}, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (5b)$$

$$d_{\hat{p}_l, c_0}^k \leq d_{\max}, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (5c)$$

$$\sum_{l=1}^L \lambda_{m,l} = 1, \quad m = 1, \dots, M \quad (5d)$$

$$\sum_{l=1}^L |B_l| \leq M \quad (5e)$$

$$\text{s. t.} \quad E_p^k \leq E_{\text{limit}}, \quad k \in A \quad (12a)$$

$$0 \leq v_l^k \leq v_{\max}, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (12b)$$

由于 UAV 在收集和传输数据时保持悬停状态与飞行速度无关,所以当第 k 架 UAV 飞行速度为 v_l^k 时,根据式(3)和式(4)可知,展开后存在 $(\sqrt{1/(v_l^k)^4 + 1/4v_0^4} - 1/2v_0^2)^{1/2}$,则除约束(12a)外,其他约束和目标函数对于速度均为凸。因此,本文首先引入松弛变量 $\varphi^k = \{\varphi_l^k > 0, l \in L^k\}$,其中 $\varphi_l^k = (\sqrt{1/(v_l^k)^4 + 1/4v_0^4} - 1/2v_0^2)^{1/2}, l \in L^k$,则可得: $1/[(\varphi^k)^4 + (\varphi_l^k)^2/v_0^2] = (v_l^k)^4, l \in L^k$,使得原问题变为更易处理的形式:

$$\min_{V, \varphi^k} \Gamma_p^k \quad (13)$$

$$\text{s. t.} \quad 1/[(\varphi_l^k)^4 + (\varphi_l^k)^2/v_0^2] \leq (v_l^k)^4, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (13a)$$

此时,目标函数已经被重新描述为关于变量 V 和 φ^k 的函数,但是约束(13a)仍然是非凸的,为了处理上述的非凸约束,下面使用连续凸逼近算法在每次迭代中,通过优化 UAV 的飞行速度增量,逐次最小化式(13)的全局上界,从而找到次优解。具体地,在约束式(13a)处,设 $v_k^n(\tilde{q}_l^k)$ 表示第 n 次迭代时的下界表达式,应用一阶泰勒展开式可得到:

$$v_k^n(\tilde{q}_l^k) = 4(v_l^k)^n + 4(v_l^k)^n[v_l^k - (v_l^k)^n] \leq (v_l^k)^4, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (14)$$

此时,问题(20)可以表述为:

$$\min_{V, \varphi^k} \Gamma_p^k \quad (15)$$

$$\text{s. t.} \quad v_k^n(\tilde{q}_l^k) = 4(v_l^k)^n + 4(v_l^k)^n(v_l^k - (v_l^k)^n) \leq (v_l^k)^4, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (15a)$$

式(12a)、式(12b)、式(13a)

由于连续凸逼近算法保证单调收敛,因此问题能保证收敛到满足 KKT 条件的局部最优解。此时,问题(15)已经转化为凸问题,可以用现有的凸优化工具箱进行求解,如 CVX。

3.3 UAV 传输速率优化

在给定 UAV 任务分配前提下,UAV 传输速率优化问题可以表述如下:

$$\min_R \Gamma_p^k \quad (16)$$

$$\text{s. t.} \quad E_p^k \leq E_{\text{limit}}, \quad k \in A \quad (16a)$$

$$d_{\rho_l, c_0}^k \leq d_{\max}, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (16b)$$

由式(1)可知,数据传输这一项是非凸的,因此(16),式(16a)和式(16b)均为非凸,这里为了计算,将信道增益作简化处理:

$$h_{l, c_0} = \hat{P}_{\rho_l, c_0}^{\text{LoS}} \beta_0 (d_{\rho_l, c_0})^{-\alpha} \quad (17)$$

式中, $\hat{P}_{\rho_l, c_0}^{\text{LoS}} = P_{\rho_l, c_0}^{\text{LoS}} + (1 - P_{\rho_l, c_0}^{\text{LoS}})\kappa$,根据文献[19]可将速率用 Jensen 不等式近似,则:

$$R_{\rho_l, c_0} \approx B \log_2 \left[1 + \frac{\gamma_0}{(d_{\rho_l, c_0})^{\alpha/2}} \right] \quad (18)$$

其中, $\gamma_0 = P_u \beta_0 \hat{P}_{\rho_l, c_0}^{\text{LoS}} / (\sigma^2 \Gamma)$,将 LOS 概率使用齐次近似 $\hat{P}_{\rho_l, c_0}^{\text{LoS}} \approx \bar{P}_{\rho_l, c_0}^{\text{LoS}}$,根据[17]将 $\bar{P}_{\rho_l, c_0}^{\text{LoS}}$ 设置为最有可能仰角对应的值,并得到 $d_{\max} = \sqrt{(\gamma_0 / \text{SNR}_{\min})^{2/\alpha}}$,其中 $\text{SNR}_{\min}$ 表示满足数据传输条件的最小信噪比。在这里,本文引入松弛变量 $Z^k = \{\alpha_l^k, \beta_l^k, \gamma_l^k\}$,其中 $\alpha_l^k = d_{\rho_l, \tilde{q}_{l+1}}^k, \beta_l^k = d_{q_l, \tilde{p}_l}^k, \gamma_l^k = R_{\rho_l, c_0}^k, l \in L^k$,则问题(16)可表述为:

$$\min_{R, Z^k} \Gamma_p^k \quad (19)$$

$$\text{s. t.} \quad d_{\rho_l, \tilde{q}_{l+1}}^k \leq \alpha_l^k, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (19a)$$

$$d_{q_l, \tilde{p}_l}^k \leq \beta_l^k, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (19b)$$

$$\gamma_l^k \leq R_{\rho_l, c_0}^k, \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (19c)$$

此时,目标函数已经被重新描述为关于变量 Z^k 和 R 的函数,但是约束式(19c)仍然是非凸的。为了处理上述的非凸约束,令 $R_k^n(\tilde{p}_l^k)$ 表示第 n 次迭代时的下界表达式, $\tilde{p}_l^k(n)$ 表示在第 n 次迭代时得到的局部点,根据文献[20—21]可得:

$$R_k^n(\tilde{p}_l^k) \leq \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{(\|\tilde{p}_l^k\|^2 + H_u^2)^{\alpha/2}} \right) \quad (20)$$

应用一阶泰勒展开得到:

$$R_k^n(\tilde{p}_l^k) = \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{(\|\tilde{p}_l^k\|^2 + H_u^2)^{\alpha/2}} \right) - \phi_l(\|\tilde{p}_l^k\|^2 - \|\tilde{p}_l^k(n)\|^2) \quad (21)$$

式中

$$\phi_l = \frac{(\log_2 e) \gamma_0 \alpha / 2}{[\|\tilde{p}_l^k(n)\|^2 + H_u^2][\|\tilde{p}_l^k\|^2 + H_u^2] \alpha / 2 + \gamma_0}, \quad \text{则问题(19)可表述为:}$$

$$\min_{R, Z^k} \Gamma_p^k \quad (22)$$

$$\text{s. t.} \quad \gamma_l^k \leq R_k^n(\tilde{p}_l^k), \quad k \in A, \quad l \in L^k \quad (22a)$$

式(16a)、式(16b)、式(19a)、式(19b)

此时,问题(22)已经转化为凸问题,可如(15),使用凸优化工具箱求解。

3.4 最小化 PAoI 策略

基于 AP、蚁群和 SCA 技术,提出了一种最小化 PAoI 策略求解优化问题。具体地,在每次迭代中,固定其他变量,分别通过优化求解问题(6)、(11)、(15)和(22)得到 UAV 的任务分配、飞行速度和传输速率。具体流程如算法 1 所示。

算法 1:最小化 PAoI 策略

- 1) 初始化 W^0, V^0, R^0 , 并设置迭代次数 $n = 0$;
- 2) 通过求解问题(6)获得用户和 CP 的关联;
- 3) 对于每一次迭代 n ;
- 4) 通过求解问题(11)得到 UAV 任务分配 W^n ;
- 5) 通过求解问题(15)得到 UAV 飞行速度 V^n ;
- 6) 通过求解问题(22)得到 UAV 传输速率 R^n ;
- 7) 更新迭代次数 $n = n + 1$;
- 8) 直到问题(5)目标函数收敛;
- 9) 算法结束。

4 仿真结果

在本节中,给出仿真结果来评估所提出的联合算法的性能。采用 MATLAB 进行了仿真实验。假设地理区域是一个半径为 1000 m 的区域,UAV 在 $t = 0$ 时离开初始位置。 $P_m = 0.01\text{ W}, P_u = 0.1\text{ W}, \Gamma = 9\text{ dB}, \text{SNR}_{\min} = 5\text{ dB}$, 初始飞行速度 $V_k = 20\text{ m/s}, \bar{P}_{p_i, c_0}^{\text{LoS}}$ 设置为仰角 14.5° 对应的值。对于 UAV 的推进功率消耗参数,设置 $d_0 = 0.6, U_{ip} = 120, A_{\text{disc}} = 0.503, \rho = 1.225, s_0 = 0.05, P_0 = 79.86, P_1 = 88.63, v_0 = 4.03$, 其他实验参数如表 1 所示。

表 1 仿真设置

符号	定义	数值
H_u	固定飞行高度 (m)	80
M	用户数量	70
w_m	数据包大小 (bits)	6 M
B	系统带宽 (Hz)	1 M
σ^2	噪声功率 (dbm)	-100
a, b	环境常数	10, 0.6
β_0	$d_0 = 1\text{ m}$ 时的信道增益 (dB)	-60
α	路径损耗指数	2.2
κ	NLOS 链路的额外衰减因子	0.2
$v_{\max}$	UAV 最大飞行速度 (m/s)	40

本文将与以下几种策略进行比较:

(1)混合贪心收集策略:与本文策略类似,采用

AP 算法获得用户和 CP 的关联、K-means 聚类对任务进行分配、贪心算法来确定 UAV 轨迹,同样优化了 UAV 飞行速度,标记为 AKG;

(2)混合随机收集策略:与上相同,不同的是采用随机算法确定 UAV 轨迹,标记为 AKR;

(3)混合蚁群收集策略:使用文献[15]的收集策略,即 UAV 收集完所有数据后再飞回数据中心进行传输,采用 AP 算法获得用户和 CP 的关联、K-means 聚类对任务进行分配、蚁群算法来确定 UAV 轨迹,标记为 AKA。另外,为了方便对比,假设 AKA 策略返回数据中心 c_0 后的数据传输时间忽略不计。

图 3、图 4 描述的是 UAV 数量等于 2、能耗阈值等于 130KJ 条件下,UAV 飞行轨迹和不同策略对 CP 区域 PAoI 的影响,CP 区域 PAoI 的值等于每个 CP 所关联的第一个用户上传数据时刻到 UAV 完成数据传输时刻所花费的时间。

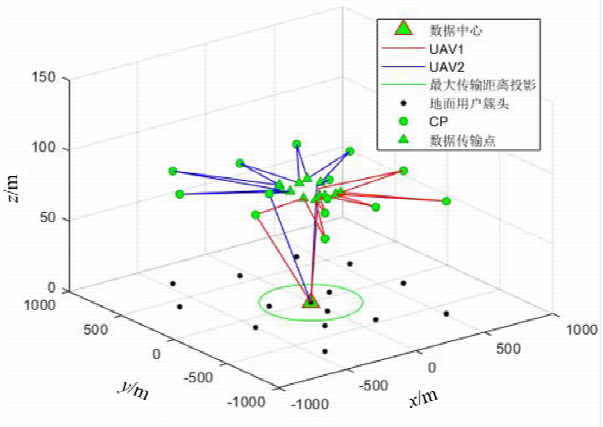


图 3 UAV 飞行轨迹

由图 4(a)可以观察到,本文策略在不同 CP 区域的 PAoI 小于 AKG 和 AKR 策略,同时也解决了图 4(b)AKA 策略中不同 CP 区域的 PAoI 差异大的缺点。这是因为本文策略在收集完一个 CP 区域数据后会立刻飞往数据传输点进行传输,而 AKA 策略是收集完所有 CP 区域数据后返回数据中心进行传输。值得注意的是,考虑到本文策略每个 CP 区域的 PAoI 要比 AKA 策略多一段从 CP 飞往数据传输点的时间,因此通常情况下 AKA 策略最后访问的 CP 区域的 PAoI 要略小于本文策略(如区域 2 和区域 9),但本文策略更加适合全局的 CP 区域,且本文策略在用户分布更大区域、拥有更大数据包和更小传输功率的情况下会更有效。

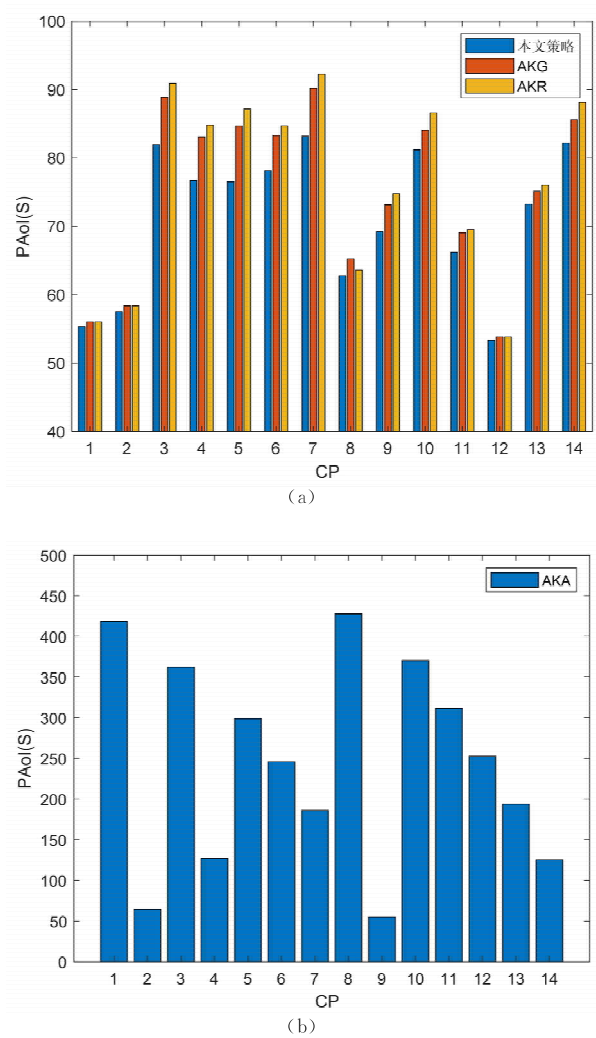


图 4 不同策略下的每个区域 PAoI

图 5 描述了在相同的聚类结果下,UAV 数量对平均任务全局 PAoI 的影响。由图可知,随着 UAV 数量的增加,全局 PAoI 减小并趋于平缓,符合任务分配的规律,验证了问题(18)即 UAV 任务分配的有效性。由本实验分析可知,在无法通过改变 UAV 工作能耗阈值以调整 PAoI 的应急场景下,可以通过增加 UAV 的数量,灵活调整全局 PAoI 的大小,达到数据收集的目地。

图 6、图 7 描述了不同策略下能耗阈值对全局 PAoI 和 UAV 平均速度的影响。由图 6 可知,UAV1 的全局 PAoI 要高于 UAV2,这是由于用户不同的位置分布所导致的聚类结果决定的。同时随着能耗阈值的增大,本文策略和对比策略的全局 PAoI 逐渐减小,且本文策略在相同能耗阈值下明显优于 AKG 和 AKR 策略。由图 7 可知,UAV 的飞行速度随能耗阈值增大而增大,且本文策略与对比策略相比能够在相同的能耗阈值下获得更大速度,验证了问题(22)即 UAV 飞行速度优化的有

效性。

结合图 6、7 可知,当能耗阈值大于 145 kJ 时,对比策略 UAV2 的全局 PAoI 保持不变,但本文策略能继续下降。这是因为当能耗阈值大于 145 kJ 时,UAV2 飞行速度将达到最大值,对比策略已经无法通过优化 UAV 飞行速度来降低全局 PAoI。而本文策略可以使 UAV 飞行到距离数据中心 c_0 更近的地方,通过提高数据传输速率来降低 PAoI,也验证了 UAV 传输速率优化的有效性。此时 UAV 的飞行能耗增加,UAV 传输数据时的悬停能耗减小,总能耗保持不变。

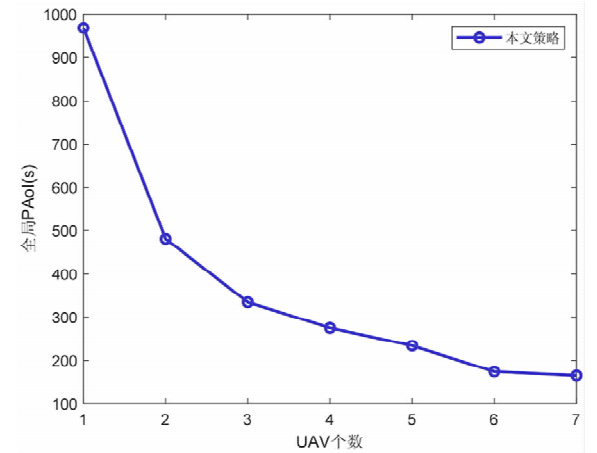


图 5 不同 UAV 数量下的平均全局 PAoI

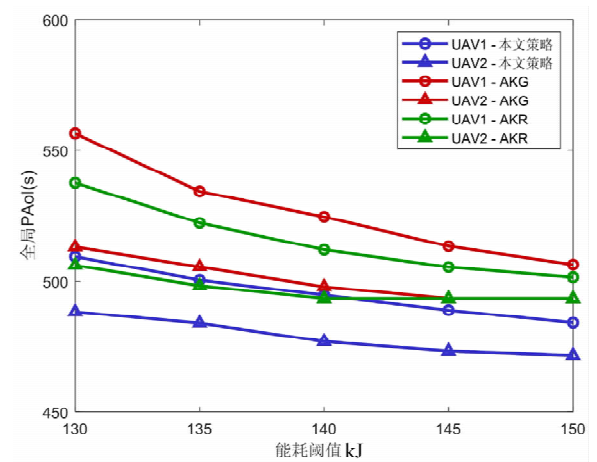


图 6 不同能耗阈值下的全局 PAoI

图 8 描述的是当能耗阈值等于 130 kJ 时,本文策略与对比策略在不同 CP 区域的 UAV 飞行速度。可以发现,本文策略在不同区域 UAV 飞行速度是要高于对比策略的,这是因为 UAV 不同的访问顺序导致不同的飞行距离,飞行距离越短,能分配更多的能量提升飞行速度,同样验证了问题(18)即 UAV 最优任务分配的有效性。值得注意的是,

当传输距离满足要求时,收集数据后可以直接传输,因此该区域的 UAV 飞行速度为 0。

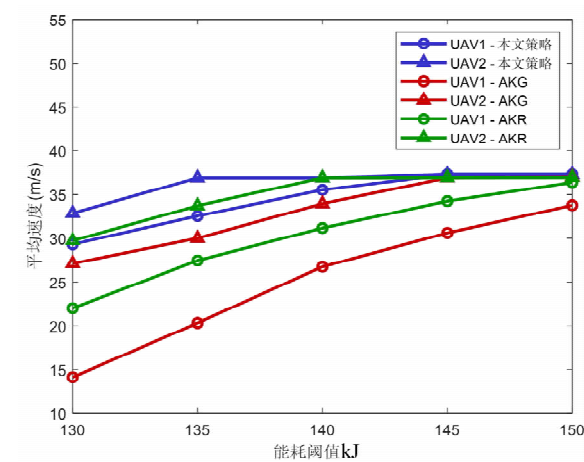


图 7 不同能耗阈值下的平均速度

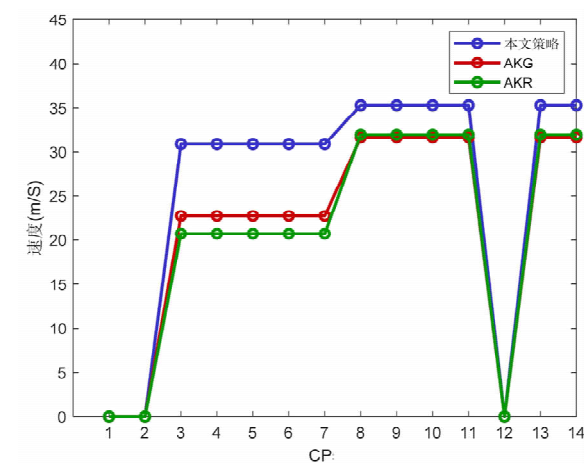


图 8 不同区域飞行速度

图 9 描述了在保证能耗的情况下用户数据包大小对不同策略全局 PAoI 的影响。由图可知,全局 PAoI 随着用户数据包增大而增大,但本文策略在相同数据包大小的情况下明显优于对比策略,这是由 UAV 不同的访问顺序、飞行速度和传输速率综合决定的。另外,当用户数据包小于 8 Mbits 时,对比策略的全局 PAoI 相同。这是考虑到对比策略传输数据时只需要满足传输条件即可,未考虑对数据传输速率的优化。因此在保证能耗的情况下,飞行速度将达到最大值,使得 UAV 飞往数据传输点的飞行时间相等,从而导致相同聚类结果下的全局 PAoI 相同,也验证了 UAV 传输速率优化的有效性。

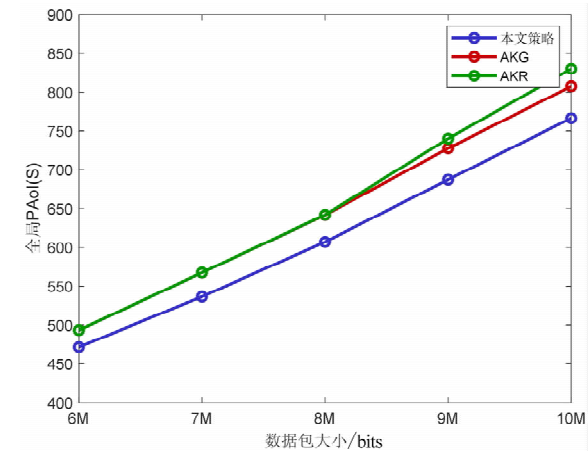


图 9 不同数据包下的任务 PAoI 总和

5 结 论

研究了应急场景下基于 PAoI 的多 UAV 数据收集策略,并基于 AP 算法、蚁群算法和 SCA 算法提出了一种联合优化算法来最小化全局 PAoI。实验结果表明,与对比策略相比,所提出的策略能实现全局的 PAoI 最小化,且能均衡每个 CP 的 PAoI,有效满足对信息新鲜程度有严格要求的应急通信场景。在未来可以加入用户移动性研究和 UAV 避障研究对用户数据新鲜程度的影响,使得通信场景更加细化具体。

参考文献

[1] MOTLAGH N H, BAGAA M, TALEB T. UAV-based IoT platform: a crowd surveillance use case[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 128—134.

[2] YANG D, WU 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.

[3] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2334—2360.

[4] JIN W, YANG J, FANG Y, et al. Research on application and deployment of UAV in emergency response[C]//2020 IEEE 10th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). IEEE, 2020: 277—280.

[5] GONG J, CHANG T H, SHEN C, et al. Flight time minimization of UAV for data collection over wireless sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 1942—1954.

- [6] 陈海华,高飞帆,何明. 灾后应急通信网络下的中继选择与轨迹优化研究[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(10): 3648—3656.
- [7] DEVIPRIYA S, MANICKAM J M L, DHANUSHYA N V, et al. Height Optimization and Channel Gain based User Pairing for UAV-Assisted Emergency Communications[C]//2023 International Conference on Sustainable Communication Networks and Application (ICSCNA). IEEE, 2023: 626—631.
- [8] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: how often should one update? [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2012: 2731—2735.
- [9] ZOU P, OZEL O, SUBRAMANIAM S. Waiting before serving: a companion to packet management in status update systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2019, 66(6): 3864—3877.
- [10] LUO Y, XU J, CHEN J, et al. UAV trajectory planning with network age of information minimization[C]//2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2022: 1862—1867.
- [11] WU T, LIU J, LIU J, et al. A novel AI-based framework for AoI-optimal trajectory planning in UAV-assisted wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 21(4): 2462—2475.
- [12] ZHU B, BEDEER E, NGUYEN H H, et al. UAV trajectory planning for AoI-Minimal data collection in UAV-aided IoT networks by transformer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 22(2): 1343—1358.
- [13] MAO C, LIU J, XIE L. Multi-UAV aided data collection for age minimization in wireless sensor networks[C]//2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2020: 80—85.
- [14] LIAO Y, FRIDERIKOS V. Energy and age pareto optimal trajectories in UAV-assisted wireless data collection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 9101—9106.
- [15] GAO X, ZHU X, ZHAI L. Aoi-sensitive data collection in multi-UAV-assisted wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(8): 5185—5197.
- [16] LI Y, ZHANG S, CHEN J, et al. Multi-UAV cooperative mission assignment algorithm based on ACO method[C]//2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). IEEE, 2020: 304—308.
- [17] ZENG Y, XU J, ZHANG R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(4): 2329—2345.
- [18] REN M, FU X, PACE P, et al. Collaborative data acquisition for UAV-aided IoTs based on time-balancing scheduling[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 11(8): 13660—13676.
- [19] BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge; Cambridge University Press, 2004.
- [20] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems[J]. IEEE Transactions on communications, 2016, 64(12): 4983—4996.
- [21] ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2017, 16(6): 3747—3760.