

无人机-车协同数据收集优化方法

赵月, 田文, 丁徐飞, 戴跃伟

(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

摘要: 无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)作为移动的数据收集平台, 凭借其优越的机动性在无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)领域中具有重要的应用前景。为了解决无线传感器网络能耗大的问题, 本研究面向传感器位置信息共享场景, 提出了一种无人机-车协同数据收集优化方法以实现无人机非定点起降下的传感器能耗最小化的优化目标。该方法考虑了各传感器的调度问题, 通过引入基于块坐标下降技术的凸优化算法迭代求解轨迹和唤醒策略交替优化中存在的混合整数非凸问题, 在满足数据收集需求的同时最小化传感器节点(Sensor nodes, SNs)的能耗。仿真结果表明, 本方法在典型传感器分布下能够有效降低无线传感器网络的能耗, 展现了其在更复杂环境中的潜力, 具有显著的适应性和扩展性。

关键词: 无人机; 无线传感器网络; 轨迹优化; 唤醒策略; 自动驾驶汽车

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Optimization Method for UAV-Vehicle Collaborative Data Collection

ZHAO Yue, TIAN Wen, DING Xufei, DAI Yuewei

(School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: As a mobile data collection platform, unmanned aerial vehicle (UAV) has significant application prospects in the field of wireless sensor network (WSN) due to its superior mobility. To solve the problem of high energy consumption in wireless sensor networks, this study proposes a UAV-vehicle collaborative data collection optimization method for the sensor location information sharing scenario to achieve the optimization goal of minimizing sensor energy consumption under non-fixed take-off and landing of UAVs. This method considers the scheduling problem of each sensor, specifically, by introducing a convex optimization algorithm based on block coordinate descent techniques to iteratively solve the mixed integer non-convex problem in the alternating optimization of trajectory and wake-up strategy. This approach ensures that the data collection needs are met while minimizing the energy consumption of the sensor nodes (SNs). Simulation results demonstrate that this method can effectively reduce the energy consumption of wireless sensor networks in typical sensor distributions, showing its potential in more complex environments and its significant adaptability and scalability.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); wireless sensor network (WSN); trajectory optimization; wake-up strategy; autonomous vehicles

基金项目: 国家自然科学基金(U21B2003, 62072250); 国家重点研发计划(2021QY0700); 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB120007); 江苏省科技计划专项资金(基础研究计划自然科学基金)项目(BK20230415)。

收稿日期: 2024-03-12; **修订日期:** 2024-07-18

引言

无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)通常由大量低成本传感器节点(Sensor nodes, SNs)组成,这些传感器节点一般依赖于电池等有限能源供电,一旦能量耗尽就很难再充电^[1-3]。因此,开发高效的节能传感和通信技术对于延长无线传感器网络的使用寿命具有至关重要的意义。为了应对上述问题,无线传感器网络引入具有高移动性的无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)作为地面SNs的移动数据收集器^[4-5]。无人机作为一种移动数据采集器,不受地面运输机动性的限制,它们可用于具有复杂地理环境的大规模无线传感器网络^[6]。借助其卓越的机动性,无人机能够在靠近传感器节点的地方进行数据收集,从而提高了数据收集过程的效率和质量^[7-8]。

对于支持UAV的WSNs,睡眠和唤醒机制是另一种有效的技术,可以节省SNs的能量消耗^[9-11]。这一机制旨在通过管理传感器节点的活动状态来节约能量。在大部分时间里,SNs保持在低能耗的睡眠状态,以减少不必要的能量消耗。当无人机靠近并发出唤醒信号时,这些节点被激活,从睡眠状态转变为唤醒状态。在唤醒状态下,SNs开始与无人机进行数据交换,完成数据传输后,节点再次回到睡眠状态。这种策略不仅有助于延长每个节点的电池寿命,还能提高整个网络的能源效率。通过精确控制SNs的活动周期,可以在保证数据收集任务有效完成的同时,最小化网络的总体能耗^[12]。因此,为确保SNs的能耗最小化,合理设计UAV的飞行轨迹和SNs的唤醒策略显得尤为重要。这种策略能够有效地协调无人机的数据收集任务和SNs的能源效率,从而实现整体网络性能的最优化。

目前部分工作研究了WSNs中引入无人机进行数据采集。文献[13]采用了时分多址(Time division multiple access, TDMA)的介质访问控制(Medium access control, MAC)协议,根据传感器的数据量和无人机的距离分配唤醒传感器的传输时隙,确保了数据采集的公平性,但增加了因距离而产生的能耗。文献[14]提出了一种分布式的无人机协调方法,用于无线传感器网络的数据收集。该方法重点在于提高数据收集效率并减少通信范围的限制,通过无人机小队的协调操作,无需依赖优化技术即可实现与路径优化方法相似或更优的数据收集效果,显著减少了接收传感器消息的延迟,降低了无人机的处理需求。对于无人机轨迹,文献[15]采用了固定且匀速飞行的无人机轨迹,适用于传感器均匀分布且数据量相同的场景,但缺乏灵活性,可能浪费通信资源。文献[16]通过联合优化无人机轨迹、地面节点的通信时间分配以及总任务时间,有效降低了无线通信系统的能耗,无人机的轨迹和速度均可变化,提升了系统效率。

在无人机的数据处理与行程规划问题中,除了传统的能耗和效率优化外,数据安全和数据融合也是至关重要的问题。随着无人机技术在各种复杂环境中的应用增多,确保数据在传输和处理过程中的安全性变得尤为关键。例如,文献[17]通过智能反射面和无人机的组合提高了合法监听器的监听速率,同时降低了能耗,突出了数据安全技术的应用价值。此外,文献[18]探讨了在无人机集群中实现高效数据融合的策略,显示了通过算术平均和一致性原则来处理感知数据的分布式融合问题。

然而,在现有的研究中,大多数情况下UAV的起终点是固定的,而将无人机与地面汽车进行联动的问题却鲜有探讨。考虑到自动驾驶汽车的发展,提出一种创新的思路:利用这些汽车作为无人机的起飞和降落平台,同时为其提供能源补给和数据处理服务。在这种模式下,无人机的任务不仅限于高效地从传感器网络收集数据,还包括与移动汽车的同步配合以及能源效率的优化。

本文深入探讨了这一新颖的方案,重点研究了无人机在完成对SNs的数据收集任务后,如何高效地飞往预定的移动汽车位置。这涉及到路径优化、能源管理以及与移动平台的协调等一系列复杂问题。本文目标是建立一个综合框架,旨在最大化无人机在数据收集和传输过程中的效率,同时确保与移动地面单位的无缝对接。通过这种方法,希望为无人机在物联网数据收集领域,特别是在动态领域

的应用开辟新的可能性。本文的主要贡献体现在以下两个方面:首先,与传统的仅依靠无人机辅助的传感器网络进行数据采集的场景相比,开创性地将无人机与自动驾驶汽车结合,共同支持无线传感器网络的数据采集任务,在此模型中,自动驾驶汽车不仅作为无人机的起飞与降落平台,而且还承担能源补给与数据处理的重要角色;其次,在优化目标的设计上进行了创新,不仅追求最小化传感器的能耗,还将自动驾驶汽车的速度纳入考量,并通过加权方法综合平衡所有传感器节点的通信吞吐量的加权最小值与自动驾驶汽车的速度,从而实现了更全面的系统性能优化。

1 系统模型和问题阐述

1.1 无人机协同自动驾驶汽车采集信息场景下的传感网络模型

本文考虑一个由2辆自动驾驶汽车、1架UAV、以及 K 个SNs组成的无线网络,如图1所示。在这个场景中,无人机作为移动数据采集器,从第1辆自动驾驶汽车当前的位置(记为 q_0)起飞,在完成对SNs的数据收集工作后,返回到第2辆汽车预计的移动终点位置(记为 q_F)。其中,第1辆和第2辆汽车的起始位置是已知的,而第2辆汽车的终点位置则是随着自动驾驶汽车的移动而动态变化的。自动驾驶汽车的速度用 v_c 表示,是根据规定时间内无人机数据采集情况优化而来的。场域内

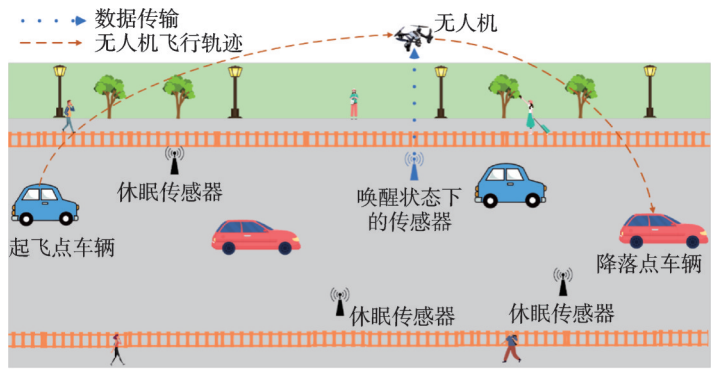


图1 无人机协同自动驾驶汽车采集信息模型图

Fig.1 Model diagram of information collection by UAV and autonomous vehicles

有 K 个SNs,用集合 $\{u_k, k=1, 2, \dots, K\}$ 表示这 K 个SNs,每个 u_k 的位置用二维坐标 $w_k \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 表示。每个 u_k 产生大小为 D_k 比特的传感数据,无人机在 T 秒时间内收集传感数据。假设无人机在飞行中保持高度为 H 米,并且其最高速度限制为 $V_{\max}$ m/s。该无人机在地面上的运动路径可以表示为一个连续的轨迹点序列 $q(t) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}, 0 \leq t \leq T$ 。为了简化分析,本研究将无人机的飞行过程分为 M 个等长的时间间隔,每个时间间隔被称为时隙,持续时间为 δ_t 。因此,整个飞行时间 T 可以用公式 $T = M\delta_t$ 表达,表明飞行时间是每个时隙数和每个时隙持续时间的乘积。考虑到每个时隙的长度非常短,可以合理假设在每个时隙内无人机的位置基本保持不变^[19],即在时隙 m 处的位置可视为固定于 $q(m\delta_t)$ 。由此,无人机在整个飞行过程中的位置可以近似为序列 $\{q[m], 1 \leq m \leq M\}$,其中 $q[m]$ 定义为 $q(m\delta_t)$,表示无人机在第 m 个时隙的具体位置。这种方法允许准确跟踪和模拟无人机在每个时隙内的静态位置,为后续飞行分析和优化提供了基础。另外,论文中假定 $\|q_F - q_0\| \leq V_{\max} T$,这样至少存在一个可行的轨迹,无人机在时间 T 内从位置 q_0 移动到 q_F 。

假设每个时隙最多可以唤醒一个传感器节点与无人机通信。唤醒策略变量表示为 $a_k[m]$,如果在时间 m 唤醒传感器节点 u_k ,则唤醒策略变量 $a_k[m]$ 设为1,相反,对于处于非唤醒状态的传感器节点, $a_k[m]$ 设为0。因此,对于所有SNs,有 $\sum_{k=1}^K a_k[m] \leq 1, \forall m$ 。

假设无人机与地面传感器节点之间的通信链路遵循准静态块衰落信道模型,在每个时隙内保持不变,但在不同衰落块间可能发生变化。每个时隙由多个衰落块组成,每个衰落块的持续时间远小于时

隙长度^[20-21]。在这种模型下,无人机与任一传感器节点 u_k 在时隙 m 第 l 个衰落块处的信道系数可以表示为 $g_{k,u}[m,l]=\sqrt{\bar{\omega}_{k,u}[m]}\phi_{k,u}[m,l]$,其中 $\phi_{k,u}[m,l]$ 是小尺度衰落系数,而 $\bar{\omega}_{k,u}[m]$ 是反映无人机与 u_k 间距离的大尺度信道衰减。SNs和UAV之间的大尺度信道衰减可以表示为

$$\bar{\omega}_{k,u}[m]=\beta_0 d_{k,u}^{-\alpha}[m]=\frac{\beta_0}{(H^2+\|\mathbf{q}[m]-\mathbf{w}_k\|^2)^{\alpha/2}} \quad (1)$$

式中: β_0 为参考距离 $d_0=1$ m处的信道增益, H 是无人机的飞行高度,固定不变; α 为路径损耗指数; $d_{k,u}[m]$ 为UAV到地面SNs的距离,公式为 $d_{k,u}[m]=\sqrt{H^2+\|\mathbf{q}[m]-\mathbf{w}_k\|^2}$ 。

每个衰落块的小尺度衰落系数 $\phi_{k,u}[m,l]$ 假设为独立同分布随机变量,并且其均值为1。假定无人机只知道地面SNs的位置和通道分布信息(Channel distribution information, CDI),即 α 和 β_0 的值及 $\phi_{k,u}[m,l]$ 的分布。无人机的位置在每个时隙内会根据预定的飞行路径变化,但起始点和结束点与自动驾驶汽车位置一致。因此,无人机可以在每个时隙根据其飞行位置自适应地设计传输速率 $R_{k,u}[m]$ 。确定了无人机的飞行轨迹、唤醒策略 $a_k[m]$ 和地面SNs到UAV之间的传输速率 $R_{k,u}[m]$ 后,无人机将按计划唤醒相应的传感器节点,并通过下行链路通知每个传感器节点随时隙变化的最优传输速率。

如果第 k 个传感器节点在时隙 m 处于唤醒状态,则对于时隙 m 的第 l 个衰落块,传感器节点 u_k 与UAV之间的信道容量可表示为

$$C_{k,\text{channel}}[m,l]=\log_2\left(1+\frac{|g_{k,u}[m,l]|^2 P_k}{\sigma^2 \gamma}\right) \quad (2)$$

式中: σ^2 为噪声功率, P_k 为传感器节点的传输功率, γ 为实际调制方案与理论高斯信号之间的信噪比差^[22]。则在时隙 m 的第 l 个衰落块处,第 k 个传感器节点 u_k 与无人机之间的中断概率为^[23]

$$\begin{aligned} p_{k,u}^e[m,l]&=P(\log_2(1+\frac{|g_{k,u}[m,l]|^2 P_k}{\sigma^2 \gamma})<R_{k,u}[m])= \\ &P(\log_2(1+\frac{\bar{\omega}_{k,u}[m]|\phi_{k,u}[m,l]|^2 P_k}{\sigma^2 \gamma})<R_{k,u}[m])= \\ &P(|\phi_{k,u}[m,l]|^2 < \frac{(2^{R_{k,u}[m]}-1)\sigma^2 \gamma}{\bar{\omega}_{k,u}[m] P_k})=F(\frac{(2^{R_{k,u}[m]}-1)\sigma^2 \gamma}{\bar{\omega}_{k,u}[m] P_k})=p_{k,u}^e[m] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $F(\cdot)$ 表示小规模衰落系数 $|\phi_k[m,l]|^2$ 的累积分布函数(Cumulative distribution function, CDF),其表达式为 $F(z)=1-Q_1(\sqrt{2K_c}, \sqrt{2(K_c+1)z})$,其中 $Q_1(a,b)$ 为Marcum-Q函数的第1种形式^[24]。值得注意的是,函数 $p_{k,u}^e[m]$ 随传输速率 $R_{k,u}[m]$ 非递减。因此,为了确保无人机可靠地收集每个传感器节点的信息, $R_{k,u}[m]$ 的选择应该使 $p_{k,u}^e[m]=\tau$,其中 τ 表示最大可接受的中断概率。因此,地面SNs到UAV之间的传输速率可以表示为^[23]

$$R_{k,u}[m]=\log_2\left(1+\frac{F^{-1}(\tau)P_k\beta_0}{\sigma^2 \gamma (H^2+\|\mathbf{q}[m]-\mathbf{w}_k\|^2)^{\alpha/2}}\right) \quad (4)$$

1.2 问题阐述

假设唤醒策略 $\mathbf{A}=[a_k[m], \forall k, m]$ 和UAV的轨迹 $\mathbf{Q}=[\mathbf{q}[m], \forall m]$ 分别代表SNs的激活状态和无人机的飞行路线。为了确保所有SNs之间能耗的公平性,本研究的目标是共同优化唤醒策略 $\mathbf{A}$ 和UAV的轨迹 $\mathbf{Q}$,以实现所有SNs最大能耗的最小化。同时,通过优化自动驾驶汽车的速度 v_c ,确保

UAV在数据采集任务完成后能精确地降落在移动汽车上。本研究定义了UAV在每个时隙内的最大飞行距离 $D_{\max} \triangleq V_{\max} \delta_t$ (单位:m)、每个传感器节点 u_k 在唤醒状态下的能量消耗 $E_k \triangleq P_k \delta_t$ (单位:J) 以及传感器节点在每个时隙内必须满足的最低传输速率 $r_k \triangleq D_k / (B \delta_t)$ (单位: $\text{b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$), 其中 D_k 是该传感器节点在整个任务周期内所需传输的目标数据量。因此, 无人机与自动驾驶汽车协同的数据收集优化问题可以表示为

$$\begin{aligned}
 \text{P1: } \min_{A, Q, v_c} & \sum_{m=1}^M a_k[m] E_k \\
 \text{s.t. (a)} & \sum_{m=1}^M a_k[m] R_{k,u}[m] \geq r_k \quad \forall k \\
 & \sum_{k=1}^K a_k[m] \leq 1 \quad \forall m \\
 \text{(c)} & a_k[m] \in \{0, 1\} \quad \forall k, m \\
 \text{(d)} & 0 \leq v_c \leq 25 \\
 \text{(e)} & \|q[m] - q[m-1]\| \leq D_{\max} \quad m \geq 2 \\
 \text{(f)} & q[1] = q_0, q[M] = v_c T
 \end{aligned} \tag{5}$$

式中: 约束(5a)确保从每个传感器节点可靠地收集目标数据量; 约束(5b)和(5c)作为 UAV-SNs 调度约束, 确保每个时隙最多只有1个传感器节点被唤醒向 UAV 传输数据。约束(5d)规定了自动驾驶汽车必须遵循的速度限制, 即最终优化所得的自动驾驶汽车速度 v_c 必须在该区间之内; 约束(5e)和约束(5f)分别对应于无人机的速度和初始/最终位置约束。

2 问题求解

P1问题是一个混合整数非凸问题, 难以直接求解。为了便于分析, 首先引入松弛变量 θ , 进而推导出以下定理。

定理 1 引入松弛变量 θ , 通过求解以下问题, 总能得到 P1 问题的最优解:

$$\begin{aligned}
 \text{P2: } \min_{A, Q, \theta, v_c} & \theta \\
 \text{s.t. (a)} & \sum_{m=1}^M a_k[m] E_k \leq \theta \quad \forall k \\
 & \sum_{m=1}^M a_k[m] R_{k,u}[m] \geq r_k \quad \forall k \\
 \text{(c)} & \sum_{k=1}^K a_k[m] \leq 1 \quad \forall m \\
 \text{(d)} & a_k[m] \in \{0, 1\} \quad \forall k, m \\
 \text{(e)} & 0 \leq v_c \leq 25 \\
 \text{(f)} & \|q[m] - q[m-1]\| \leq D_{\max} \quad m \geq 2 \\
 \text{(g)} & q[1] = q_0, q[M] = v_c T
 \end{aligned} \tag{6}$$

式中: 约束(6a)保证每个传感器节点的能耗不超过 θ , 其中 θ 是表示需要最小化的 SNs 最大能耗的松弛变量。

证明: 引入变量 θ 确实扩大了优化问题的可行域, 因为 $\sum_{m=1}^M a_k[m] E_k \leq \theta, \forall k$ 。如果对于每个传

感器节点,其总能耗之和 $\sum_{m=1}^M a_k[m] E_k$ 恰好等于 θ , 即 $\sum_{m=1}^M a_k[m] E_k = \theta$, 则问题 P2 的最优解与问题 P1 的最优解一致。进一步假设,如果传感器节点的能耗总和严格小于 θ , 即存在不等式

$$\sum_{m=1}^M a_k[m] E_k < \theta \quad \forall k \quad (7)$$

设原问题 P1 中的所有传感器节点的最大能耗为 θ^* , 即 $\theta^* = \max \left(\sum_{m=1}^M a_k[m] E_k \right)$ 。对于任何大于 θ^* 的 θ , 它都满足约束 (7); 而对于任何小于 θ^* 的 θ , 必定无法满足约束 (7)。由于问题 P2 在可行解中选择最小的 θ , 因此证明了最优解 $\theta^* = \theta$ 。因此, 虽然 P2 问题扩大了可行域, 但问题 P2 和问题 P1 的最优解是相同的, 并且总是可以实现的。

鉴于问题 P2 是一个混合整数非凸优化问题, 直接寻找最优解的难度较大, 本文旨在寻求一个有效的次优解。具体操作中, 首先将 (5c) 中的二进制唤醒策略约束放宽为 $0 \leq a_k[m] \leq 1$, 然后应用块坐标下降技术对松弛问题进行迭代求解。在此过程中, 交替对唤醒策略 A 和 UAV 的飞行轨迹 Q 进行优化, 涉及的两个子问题分别处理: (1) 给定 UAV 轨迹的情况下优化唤醒策略; (2) 给定唤醒策略的条件下优化 UAV 轨迹。

2.1 给定 UAV 轨迹下 SNs 唤醒策略的优化

对于任意给定无人机的轨迹 Q , 唤醒策略优化问题表示为

$$\begin{aligned} \text{P3: } \min_{A, \theta, v_c} \quad & \theta \\ \text{s.t. (a)} \quad & 0 \leq a_k[m] \leq 1 \quad \forall k, m \\ \text{(b)} \quad & \sum_{m=1}^M a_k[m] E_k \leq \theta \quad \forall k \\ \text{(c)} \quad & \sum_{m=1}^M a_k[m] R_{k,u}[m] \geq r_k \quad \forall k \\ \text{(d)} \quad & \sum_{k=1}^K a_k[m] \leq 1 \quad \forall m \\ \text{(e)} \quad & 0 \leq v_c \leq 25 \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 给定 SNs 唤醒策略下 UAV 轨迹的优化

对于任何给定的唤醒策略 A , UAV 的轨迹优化旨在最大化所有传感器节点的通信吞吐量的加权最小值, 其中这个权重与 r_k 成反比。并且引入松弛变量 ϕ 。此外, 为了将自动驾驶汽车的移动速度 v_c 纳入总体优化, 本文对目标函数 ϕ 进行加权, 形成新的目标函数 $\lambda\phi + \mu v_c$ 。这里, λ 和 μ 为设置的权重, 以平衡这两个方面的考虑。具体而言, 这个问题可以描述为

$$\begin{aligned} \text{P4: } \max_{Q, \phi, v_c} \quad & \lambda\phi + \mu v_c \\ \text{s.t. (a)} \quad & \frac{1}{r_k} \sum_{m=1}^M a_k[m] R_{k,u}[m] \geq \phi \quad \forall k \\ \text{(b)} \quad & \|q[m] - q[m-1]\| \leq D_{\max} \quad m \geq 2 \\ \text{(c)} \quad & 0 \leq v_c \leq 25 \\ \text{(d)} \quad & q[1] = q_0, q[M] = v_c T \end{aligned} \quad (9)$$

虽然非凸约束 (9a) 不能直接对该优化问题进行求解, 但是, 采用连续凸优化方法可以提供有效的近似解, 确保了至少能够收敛至局部最优解。在此优化过程中, 设定 $Q^l = [q^l[m], \forall m]$ 表示第 l 次

迭代中给定的轨迹。通过对式(4)中 $R_{k,u}[m]$ 的下界进行一阶泰勒展开近似,本研究以一种高效且稳定的方式逐步逼近最优解,从而有效处理非凸问题。式(4)中 $R_{k,u}[m]$ 下界可以表示为

$$R_{k,u}[m] \geq R_{k,u,l}^{lb}[m] \triangleq B_{k,u,l}[m] - Y_{k,u,l}[m] \|q[m] - w_k\|^2 + Y_{k,u,l}[m] \|q'[m] - w_k\|^2 \quad (10)$$

其中

$$B_{k,u,l}[m] \triangleq \log_2 \left(1 + \frac{F^{-1}(\tau) P_k \beta_0}{\sigma^2 \gamma Z_{k,u,l}[m]^{\alpha/2}} \right) \quad (11)$$

$$Y_{k,u,l}[m] = \frac{F^{-1}(\tau) P_k \beta_0 (\alpha/2) \log_2 e}{Z_{k,u,l}[m] (\sigma^2 \gamma Z_{k,u,l}[m]^{\alpha/2} + F^{-1}(\tau) P_k \beta_0)} \quad (12)$$

$$Z_{k,u,l}[m] = H^2 + \|q'[m] - w_k\|^2 \quad (13)$$

将 $R_{k,u,l}^{lb}[m]$ 代入优化问题 P4, 问题 P4 可以转化为

$$\begin{aligned} \text{P5: } & \max_{\mathbf{Q}, \phi^{lb}, v_c} \lambda \phi^{lb} + \mu v_c \\ \text{s.t. (a)} & \frac{1}{r_k} \sum_{m=1}^M a_k[m] R_{k,u,l}^{lb}[m] \geq \phi^{lb} \quad \forall k \\ & (b) \|q[m] - q[m-1]\| \leq D_{\max} \quad m \geq 2 \\ & (c) 0 \leq v_c \leq 25 \\ & (d) q[1] = q_0, q[M] = v_c T \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $R_{k,u,l}^{lb}[m]$ 是一个关于 $q[m]$ 的凹函数。P4 已经成功转化成了凸优化问题 P5, 可以通过现有的软件工具(如 CVX)高效地求解。

2.3 基于块坐标下降技术的迭代算法

基于前两节对单独 SNs 唤醒策略优化和 UAV 轨迹优化问题的分析, 本节提出了一种基于块坐标下降技术的迭代算法。该算法通过对问题 P3 和 P5 两个子问题依次进行求解, 并采用交替迭代算法来得到优化结果。这种方法有效地协调了 SNs 唤醒策略与 UAV 轨迹规划之间的平衡, 以达到整体优化的目的。具体算法流程如算法 1 所示。

算法 1 求解 P1 的迭代算法

- (1) 初始化无人机轨迹为 $\mathbf{Q}^0$ 。
- (2) 设置迭代计数器 $r=0$, 并设定一个容忍度 $\kappa = 1 \times 10^{-6}$ 。
- (3) 重复。
- (4) 对于给定的轨迹 $\mathbf{Q}^r$, 求解问题 P3 以获得唤醒策略 $\mathbf{A}^{r+1}$ 。
- (5) 对于给定的 $\{\mathbf{A}^{r+1}, \mathbf{Q}^r\}$, 求解问题 P5, 得到更新轨迹 $\mathbf{Q}^{r+1}$ 和自动驾驶汽车速度 v_c^{r+1} 。
- (6) 更新迭代计数器 $r = r + 1$ 。
- (7) 直到 $|\theta^{r+1} - \theta^r| < \kappa$ 。
- (8) 输出优化结果 $\mathbf{A}, \mathbf{Q}, \phi, v_c$ 。

2.4 收敛性分析

从算法 1 的第(4)步之后可以观察到, 式(5a)中的约束均被满足。此外, 在 P4 中对传感器节点的通信吞吐量和无人驾驶汽车的速度进行了最大化加权, 从而使得在执行第(5)步时可以适当放宽约束(5a)。这种策略确保了 P3 中的目标值在迭代过程中保持稳定不增加。并且, 由于 P3 的目标值具有确定的有限下界, 这进一步保证了算法 1 的收敛性。

3 数值结果与分析

本节提供了数值结果来验证本文提出的设计。本文考虑1个 $K=4$ 个SNs的系统,这些SNs随机分布在一个 $1\,200\,\text{m}\times 1\,200\,\text{m}$ 的二维区域内且位置已知。考虑到无人机相对运动,其初始速度可以设置为0。因此,本研究中可以为无人机在起始位置(即第1辆车的位置)指定一个初始坐标 $\boldsymbol{q}_0=[-900,0]^\text{T}\,\text{m}$ 。无人机的最终位置(即无人机数据采集任务完成时第2辆汽车的位置)设置为 $\boldsymbol{q}_\text{F}=[v_\text{c}\times T,0]^\text{T}\,\text{m}$,其中第2辆车的起始位置默认设置为 $[0,0]^\text{T}\,\text{m}$ 。传感器节点坐标分别为: $[-500,600]^\text{T}\,\text{m}$, $[-200,-600]^\text{T}\,\text{m}$, $[300,400]^\text{T}\,\text{m}$, $[650,-450]^\text{T}\,\text{m}$ 。UAV的飞行高度设置为 $H=100\,\text{m}$ 。此外,具体的仿真参数设置如表1所示。

图2展现了在不同时间点下无人机轨迹的优化情况,其中 $D_\text{k}=10\,\text{Mbits}$ 且 $\tau=10^{-2}$ 。从图2中可以明显看出,随着时间 T 的增长,UAV调整了其飞行轨迹以更接近SNs,目的是为了获得更优的传输信道,从而更高效地从SNs收集信息。尤其值得关注的是,随着时间 T 的增加,无人机的终点位置发生了显著变化。由表2可知,当时间从60 s增加到80 s时,无人机的终点位置由 $[753.51,0]^\text{T}\,\text{m}$ 增加到 $[1\,498.19,0]^\text{T}\,\text{m}$,这表明无人机调整了其飞行轨迹以适应汽车的速度变化。同时,自动驾驶汽车的速度在不同时间点有所不同,但整体上保持在一个稳定的范围内。这些观察结果突出了无人机在动态环境中的适应能力,以及优化算法在调整飞行路径和适应动态目标速度方面的高效性。

$T=60\,\text{s}$ 下的无人机的唤醒策略如图3所示。观察图3可知,传感器节点在大部分时间内是处于睡眠状态的,只有当无人机足够接近它们时,才会被唤醒并向无人机传输数据。此设计有两项优化:(1)降低传输距离,减小路径损耗:当无人机飞行至传感器节点足够近距离时,直接对其进行数据传输,传输距离大幅缩短,根据路径损耗模型,信道损耗会显著减小,从而降低节点所需要的传输功率;(2)绝大部分时间让节点睡眠以节省能量:由于无人机需要飞行整个轨迹,对每个节点的停留时间有限,随意节点在无人机不在附近时都保持睡眠,切

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter settings

参数	数值
UAV飞行高度 H/m	100
UAV最大飞行速度 $V_\text{max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	50
SNs传输功率 P_k/W	0.1
参考距离 $d_0=1\,\text{m}$ 处的信道增益 β_0/dB	-60
信道带宽 B/MHz	1
噪声功率 σ^2/dBm	-110
实际调制方案与理论高斯信号之间的信噪比差 γ/dB	7
莱斯因子 K_c	10
路径损耗指数 α	2
时隙长度 δ_t/s	0.5
λ	20
μ	0.2

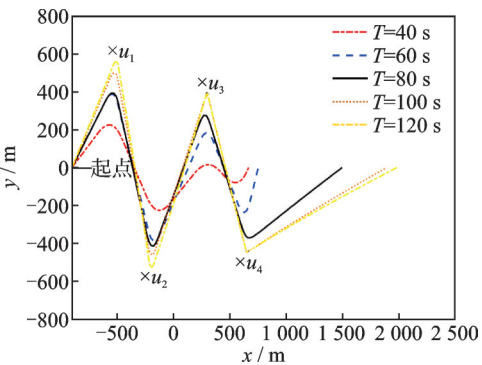


图2 不同 T 下UAV飞行轨迹

Fig.2 UAV's flight trajectories under different T

表2 不同 T 下UAV终点位置和汽车速度

Table 2 The end position of UAV and the speed of car under different T

时间 T/s	UAV 终点位置 $\boldsymbol{q}_\text{F}/\text{m}$	汽车速度 $v_\text{c}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
40	$[667.74,0]^\text{T}$	16.69
60	$[753.51,0]^\text{T}$	12.56
80	$[1\,498.19,0]^\text{T}$	18.73
100	$[1\,893.7,0]^\text{T}$	18.94
120	$[1\,985.24,0]^\text{T}$	16.54

实关闭通信模块和其他非关键模块,避免不必要的能量耗费。等无人机近距离时再短时间醒来进行数据传输。这两点设计理念的配合,既充分利用了无人机的机动性,获得了短距离高质量信道,又让节点大部分时间都在极低能耗的睡眠状态,从而整体上大大降低了传感器网络的能量消耗。

图4展示了在 $T=60\text{ s}$ 时无人机的飞行速度变化情况。从图4中可以看到,在大部分飞行过程中,无人机的飞行速度保持相对稳定。但是,当无人机接近传感器节点时,根据图3显示的SNs的唤醒策略,无人机会明显降低速度以进行数据采集。图5则展示了在不同时间点下无人机飞行速度的变化曲线。从图5中可以清晰地观察到,当无人机不进行数据采集时,它通常以接近最高速度飞行。只有在执行数据采集任务时,无人机的速度才会明显降低。随着时间 T 的增长,特别是在 $T=100\text{ s}$ 和 $T=120\text{ s}$ 的时候,这种现象尤为显著。无人机调整了飞行轨迹,以便更接近SNs,减慢速度甚至处于悬停状态以采集数据。这样做的目的是为了获取更优的传输信道,以便更高效地从SNs收集信息。

图6展示了不同 T 下,UAV的飞行轨迹总长度,这些总长度是通过将每个时间间隔内的无人机速度与对应的时隙长度相乘并求和得到的。换句话说,这些数据点反映了在每个特定的时间点 T ,无人机累计飞行的总距离。图6中清晰地描绘了无人机飞行轨迹总长度随时间的增长而增加的趋势。通过这种方式,可以直观地展示出无人机覆盖地面区域的效率,以及它和自动驾驶汽车协同在不同任务时段内的作业能力。

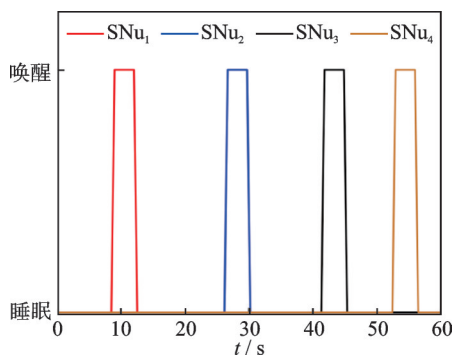


图3 $T=60\text{ s}$ 时SNs的唤醒策略

Fig.3 Wake-up strategy of SNs ($T=60\text{ s}$)

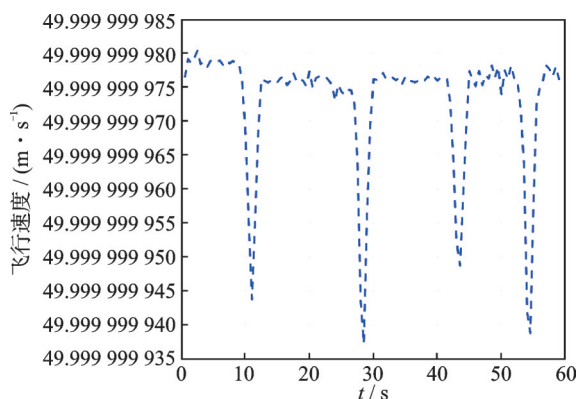


图4 $T=60\text{ s}$ 时UAV的飞行速度

Fig.4 UAV's flight speed ($T=60\text{ s}$)

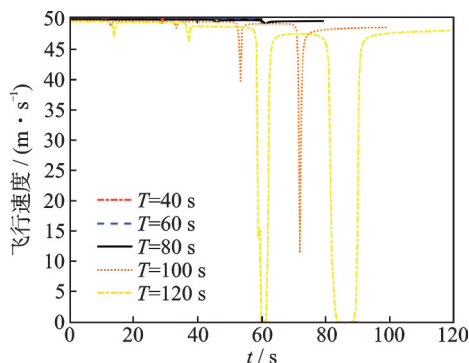


图5 不同 T 下UAV飞行速度

Fig.5 UAV's flight speed under different T

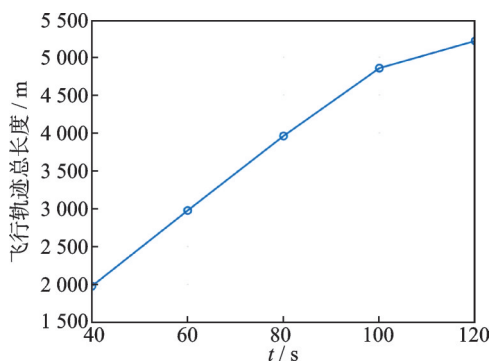


图6 不同 T 下UAV飞行轨迹总长度

Fig.6 Total length of UAV flight trajectory at different T

在图7中,将本文方法的最小化传感器最大能耗 θ 随传感数据大小 D_k 的变化情况与其他基准方法以及最新研究进展进行了比较。基准方法(1):静态中心收集方法,考虑静态收集,在该方案中,UAV的位置位于所有SNs的几何中心;基准方法(2):直线恒速飞行方法,涉及无人机沿直线路径以恒定速度 $\|q_F - q_0\|/T$ 从 q_0 直线飞行到 q_F ;基准方法(3):椭圆轨迹方法,设定无人机从 q_0 点出发,沿着以 $\|q_F + q_0\|/2$ 为中心坐标, $\|q_F - q_0\|/2$ 为长轴长度,600为短轴长度的椭圆飞行一圈;基准方法(4):理想最小能耗方法,选择最小化传感器最大能耗的下限 θ^{lb} ,其中 θ^{lb} 是基于无人机仅在每个传感器节点顶部收集数据且忽略其飞行时间的理想情况计算的。在理想最小能耗方法中, $\theta^{lb} = P_k D_k / (BR_{k,u}^{\max}[m])$, $R_{k,u}^{\max}[m] = \log_2(1 + F^{-1}(\tau)P_k\beta_0/(\sigma^2\gamma H^a))$ 。在基于平衡聚类的多无人机辅助数据收集(Gathering data assisted by multi-UAV with a balanced clustering, GAMBAC)方法中采用了文献[25]中所提的动态节能方法。从图7中可以看出,本文方案明显优于静态中心收集方法、直线恒速飞行方法和椭圆轨迹方法,略优于在单无人机场景下应用的GAMBAC方法,并且与理想最小能耗方法相比,只有很小的性能差距。

在图8中,将本文方法的最小化传感器最大能耗 θ 随中断概率目标值 τ 的变化情况与其他几种方法进行了比较。图8中的数据清楚地显示,本文方法在性能上明显优于静态中心收集方法和直线恒速飞行方法。在椭圆轨迹方法中,尽管UAV沿着椭圆轨迹飞行时,传感器的最大能耗较低,这主要是因为传感器节点恰好位于椭圆轨迹周围,UAV相对靠近SNs,有相对较好的信道进行高速率传输,导致较低的能耗,但相比于本研究提出的方法,性能仍有所不及。这归因于本研究方案中无人机能够飞得更接近SNs,甚至有可能直接停留在其上方,使得SNs在更优的信号传输环境中能以更高的数据传输速率进行可靠的数据发送,从而有效降低能耗。并且与文献[25]中GAMBAC方法在单无人机场景下的表现相比,本文方法仍具有优势。

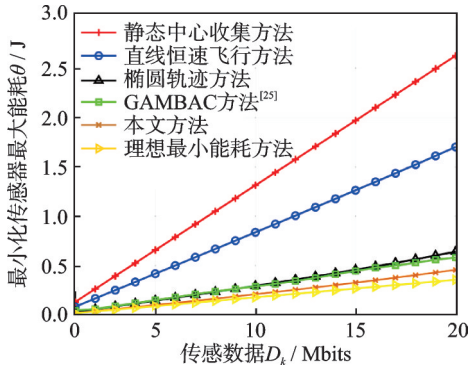


图7 最低能耗 θ 随传感数据大小 D_k 的变化

Fig.7 Minimum energy consumption θ versus sensing data size D_k

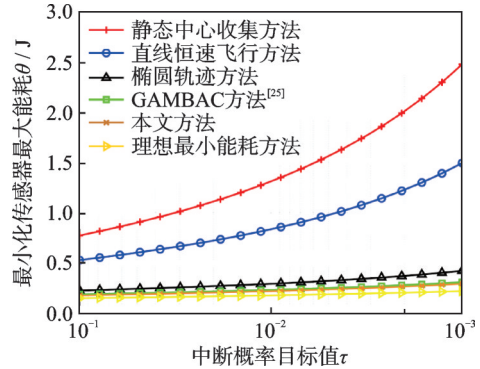


图8 最低能耗 θ 随中断概率目标值 τ 的变化

Fig.8 Minimum energy consumption θ versus outage probability target τ

4 结束语

本研究针对无人机与自动驾驶车辆协作的数据收集优化问题,提出了一种新颖的算法。此算法利用块坐标下降和连续凸优化技术,高效地交替优化无人机的飞行轨迹和传感器节点的唤醒策略。该方法旨在最小化所有SNs的最大能耗,同时确保无人驾驶汽车的速度符合与UAV协同工作的要求。仿真结果显示,该算法在节省传感器能耗和适应动态目标速度方面表现出色。相比静态中心收集方法、直线恒速飞行方法和椭圆轨迹方法,该算法能在传感数据增加和中断概率目标值降低时,展现出更平

稳的最大能耗增长,且性能接近理想情况下的理想最小能耗方法。

然而,除了算法性能之外,环境对信号传播也会产生影响,尤其是阴影衰落^[26],对通信可靠性和网络性能具有显著影响。阴影衰落,作为大尺度衰落的一种,主要由周围建筑物或其他障碍物引起,导致信号强度出现额外的衰减,这种衰减不仅影响信号的覆盖范围,还可能在网络中产生“死区”,从而影响无人机的数据收集任务和效率。

鉴于此,未来的研究需要进一步考虑这些环境因素,特别是在设计无人机通信系统时,应详细评估阴影衰落的影响。通过准确的信道模型,包括阴影衰落的考量,可以更有效地优化无人机通信系统的设计,提高其在各种环境下的操作效率。未来研究将探索此框架在更多无人机和动态环境下的应用,旨在进一步提升无线传感器网络的性能和效率。

参考文献:

- [1] TRIPATHI K, AGARWAL S. Energy efficient clustering scheme to improve the lifespan of WSN[C]//Proceeding of 2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO). Noida, India: IEEE, 2021: 1-5.
- [2] 曹润宇, 姜泽峰, 张善新. 无人机协助 WSNs 中的节能数据采集策略[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(11): 105-109.
CAO Runyu, JIANG Zefeng, ZHANG Shanxin. Energy-efficient data collection strategy in UAV-assisted WSNs[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(11): 105-109.
- [3] 孙颖, 陈思光. 基于无人机工作模式选择的无线传感器网络数据传输[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(6): 75-83.
SUN Ying, CHEN Siguang. Data transmission in wireless sensor networks based on UAV working mode selection[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 41(6): 75-83.
- [4] 周晓雅, 朱琦. 基于信息年龄的无人机缓存和轨迹优化算法[J]. 数据采集与处理, 2024, 39(1): 83-94.
ZHOU Xiaoya, ZHU Qi. UAV caching and trajectory optimization algorithm based on information age[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2024, 39(1): 83-94.
- [5] ZHU M, XU W, GUO N, et al. Joint sensor localization and data collection in UAV-assisted wireless sensor network[C]//Proceeding of the 14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Nanjing, China: IEEE, 2022: 894-899.
- [6] YANG X, FU S, WU B, et al. A survey of key issues in UAV data collection in the internet of things[C]//Proceeding of 2020 IEEE Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, International Conference on Pervasive Intelligence and Computing, Cloud and Big Data Computing, and International Conference on CyberScience and Technology Congress. Calgary, Canada: IEEE, 2020: 410-413.
- [7] WEI Z, ZHU M, ZHANG N, et al. UAV-assisted data collection for internet of things: A survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(17): 15460-15483.
- [8] 王心一, 陈志江, 雷磊, 等. 多无人机网络边缘智能计算卸载算法[J]. 数据采集与处理, 2023, 38(6): 1286-1298.
WANG Xinyi, CHEN Zhijiang, LEI Lei, et al. Multi-UAV network edge intelligent computation offloading algorithm[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2023, 38(6): 1286-1298.
- [9] ZHU G, GUO L, DONG C, et al. Mission time minimization for multi-UAV-enabled data collection with interference[C]//Proceeding of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Nanjing, China: IEEE, 2021: 1-6.
- [10] SUBASH J S, VIJAY M, PREVEEN V, et al. Sensor data harvesting using an autonomous drone[C]//Proceeding of 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). Coimbatore, India: IEEE, 2020: 612-616.
- [11] ZHAN C, HUANG R. Energy minimization for data collection in wireless sensor networks with UAV[C]//Proceeding of 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Waikoloa, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [12] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [13] ARAGHIZADEH M A, TEYMOORI P, YAZDANI N, et al. An efficient medium access control protocol for WSN-UAV[J]. Ad Hoc Networks, 2016, 52: 146-159.
- [14] SOUZA B, ENDLER M. Evaluating flight coordination approaches of UAV squads for WSN data collection enhancing the

- internet range on WSN data collection[J]. *Journal of Internet Services and Applications*, 2020, 11(1): 1-44.
- [15] HO D T, SHIMAMOTO S. Highly reliable communication protocol for WSN-UAV system employing TDMA and PFS scheme[C]//*Proceeding of 2011 IEEE Globecom Workshops (Gc Wkshps)*. Houston, USA: IEEE, 2011: 1320-1324.
- [16] 余雪勇, 邱礼翔, 宋家宁, 等. 无人机辅助边缘计算中安全通信与能效优化策略[J]. *通信学报*, 2023, 44(3): 45-54.
YU Xueyong, QIU Lixiang, SONG Jianing, et al. Secure communication and energy efficiency optimization strategy in UAV-assisted edge computing[J]. *Journal on Communications*, 2023, 44(3): 45-54.
- [17] 王贤明, 杨超群, 邵晋梁, 等. 基于智能反射面辅助的无人机主动监听优化方法[J]. *无人系统技术*, 2024, 7(1): 106-114.
WANG Xianming, YANG Chaoqun, SHAO Jinliang, et al. An optimization method for active eavesdropping by UAV aided by intelligent reflective surfaces[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2024, 7(1): 106-114.
- [18] 吕大鑫, 杨超群. 面向分布式组网无人机集群的感知数据融合方法[J]. *无人系统技术*, 2023, 6(6): 33-41.
LYU Daxin, YANG Chaoqun. An approach of sensing data fusion for distributed networked UAV swarm[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2023, 6(6): 33-41.
- [19] 季钰款. 无人机辅助通信中的轨迹规划及资源分配算法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
JI Yukuan. Research on trajectory planning and resource allocation algorithms in UAV-assisted communication[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [20] 王琦, 沈宏杰, 潘秀卫, 等. 基于聚类算法的无人机辅助 WSN 节点能量优化方案[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(6): 68-74.
WANG Qi, SHEN Hongjie, PAN Xiuwei, et al. UAV-assisted WSN node energy optimization scheme based on clustering algorithm[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 36(6): 68-74.
- [21] 罗茜. 基于深度强化学习的无人机数据采集轨迹设计与研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
LUO Xi. UAV data collection trajectory design and research based on deep reinforcement learning[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [22] 袁易. 无线传感器网络性能优化方法研究[D]. 太原: 山西大学, 2021.
YUAN Yi. Research on performance optimization methods for wireless sensor networks[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.
- [23] ZHAN C, ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 7(3): 328-331.
- [24] ONO F, OCHIAI H, MIURA R. A wireless relay network based on unmanned aircraft system with rate optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(11): 7699-7708.
- [25] NGUYEN K V, NGUYEN C H, VAN D T, et al. Efficient multi-UAV assisted data gathering schemes for maximizing the operation time of wireless sensor networks in precision farming[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(12): 11664-11674.
- [26] 朱秋明, 倪浩然, 华博宇, 等. 无人机毫米波信道测量与建模研究综述[J]. *移动通信*, 2022, 46(12): 2-11.
ZHU Qiuming, NI Haoran, HUA Boyu, et al. A review of UAV millimeter-wave channel measurement and modeling[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(12): 2-11.

作者简介:



赵月(1997-),男,硕士研究生,研究方向:无人机通信、保密通信, E-mail: 202212490202@nuist.edu.cn。



田文(1992-),通信作者,男,讲师,研究方向:隐蔽通信、物联网、网络多媒体信息安全, E-mail: 003461@nuist.edu.cn。



丁徐飞(1998-),男,硕士研究生,研究方向:无人机通信、保密通信, E-mail: xu-feiding@163.com。



戴跃伟(1962-),男,教授,研究方向:自动检测技术与装备、复杂系统建模与控制、网络多媒体信息安全, E-mail: dyw@nuist.edu.cn。

(编辑:陈璐)