

高效节能的无人机多用户携能传输优化研究

黄斐¹, 李广侠¹, 王海超¹, 丁国如¹, 田世伟², 苒敬辉³, 宋叶辉¹

(1. 陆军工程大学通信工程学院, 南京 210007; 2. 军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071; 3. 卫星通信中心, 北京 102300)

摘要: 无人机携能传输技术可用于提高物联网能效, 为能量受限的物联网地面设备补充能量, 以支持其完成不中断信息接收任务。面对无人机携能有限的现实条件及其能耗效率提升的需求, 本文针对高效节能的无人机-地面通信优化问题进行了研究, 综合考虑无人机飞行能耗和地面设备能源需求, 对无人机发射功率和功率分割比进行联合优化, 并对无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配进行设计。研究的节能最大化问题是一个非凸的、分式和混合整数规划问题。针对此问题, 本文提出一种基于连续凸逼近 (Successive convex approximation, SCA) 和经典 Dinkelbach 方法的交替迭代优化算法。最后仿真结果验证了该算法的有效性和优越性。

关键词: 无人机; 携能传输; 物联网; 能耗效率; 连续凸逼近

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

Optimization Research on Energy-Efficient UAV-Enabled Multiuser SWIPT

HUANG Fei¹, LI Guangxia¹, WANG Haichao¹, DING Guoru¹, TIAN Shiwei², CHANG Jinghui³, SONG Yehui¹

(1. College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China; 2. National Innovation Institute of Defense Technology, Chinese Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China; 3. Satellite Communication Center, Beijing 102300, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicles (UAVs) assisted simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) can be used to improve energy efficiency of Internet of Things (IoT). It can replenish energy for ground devices in IoT to complete the task of information-receiving uninterruptedly. In the face of the limited energy of UAVs and the demand for improving energy efficiency, this paper studies an energy-efficient UAV-ground communication optimization problem. We jointly optimize UAV transmit power and power splitting ratio, and design UAV trajectory and ground devices wake-up time allocation, in which UAV propulsion energy consumption and energy demand of ground devices are considered comprehensively. The formulated energy-efficiency maximization problem is a non-convex, fractional and mixed integer programming problem. To solve this problem, this paper proposes an alternate iterative optimization algorithm based on the successive convex approximation (SCA) and the classical Dinkelbach method. Finally, simulation results verify the effectiveness and superiority of the proposed algorithm.

基金项目: 科技创新 2030“新一代人工智能”重大项目(2018AAA0102303); 国家自然科学基金(61931011, 61901520, U20B2038, 61871398, 62001514); 江苏省自然科学基金杰出青年项目(BK20190030)。

收稿日期: 2022-03-07; **修订日期:** 2022-07-07

Key words: unmanned aerial vehicles (UAVs); simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT); Internet of things (IoT); energy efficiency; successive convex approximation (SCA)

引言

物联网是将所有物品通过信息传感设备与互联网连接起来,通过物品间信息交互,实现智能化识别和管理的网络^[1]。物联网中地面设备携带能源有限,而且给它们充电通常非常不方便且比较昂贵,尤其在发生灾害时,由于灾区基础设施严重被损坏,给地面设备充电几乎不可实现。所以在物联网无线通信系统中,能源问题至关重要。为此,无线携能传输技术(Simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)为在无线通信网络中传输信息的同时实现方便、持久的能源供应提供了一种新的解决手段。由于成本低、机动性强、部署灵活,无人机在农业、地质、抢险救灾等众多场景中已经得到广泛应用^[2-7]。无论在军事、民用还是学术领域,无人机辅助下的通信网络吸引了许多人广泛的关注^[8]。因为无线电信号能同时携带能量和信息,所以能量和信息可以被结合研究,无人机辅助的携能传输技术可用于物联网中^[9]。与传统的无线通信网络相比,无人机虽然具有诸多优势,但无人机辅助的无线通信网络仍存在着不可忽视的棘手挑战^[10]。其中一个重要的现实问题就是无人机电能负荷有限^[11],因此,高效节能是需要重点关注的问题。无人机驱动能耗和地面用户接收信息量是相互制衡的两个因素,单纯以牺牲无人机驱动能耗来使得用户获得更多的信息增量不是最明智的选择。为此,在无人机辅助的无线通信系统中,可以将能耗效率这个指标作为系统设计的高效节能衡量标准。在无人机辅助的物联网中,无人机同时向地面设备传递能量和传输信息。为了方便快速有效地接收信息和收集能量,地面设备需要处于监听状态。然而,在物联网应用的大多数情况下,空闲监听是导致地面设备能耗浪费的主要因素。为了解决这一问题,休眠/唤醒调度方案被采用^[12],其中,为了尽量减少空闲监听时间,每个地面设备的休眠和唤醒时间都被实时调节^[13-14]。

现有相关研究大部分都是把无人机作为空中基站或者中继,以实现信息发送/接收和转发功能^[15-18]。具体地,文献[15]研究了在无人机通信网络中,多架无人机作为空中基站为地面群用户提供信息服务。文献[16]研究无人机的三维空间部署提供按需覆盖,从而最大化地面用户接收信息速率总和。文献[17]研究无人机用于接收地面用户的发射信息。文献[18]将无人机作为中继,对无人机飞行轨迹、信息源和无人机的发射功率进行联合优化,实现端到端吞吐量的最大化。文献[18]研究的是基于缓存支持的无人机中继网络,实现地面用户中最小的安全信息速率最大化。上述文献均没有考虑无人机的耗能。然而,为了使得地面用户接收信息速率更快或信息接收量更多,无人机需要尽可能地更靠近地面设备,但这会增加它的驱动耗能。无人机的机载能源又非常有限,所以高效节能的通信方式受到人们重视^[19-26]。具体地,文献[19]研究在完成数据采集任务的前提下,最小化无人机和地面传感器的总能耗。文献[21]研究无人机与地面终端之间不同的最优能耗权衡,并对地面终端发射功率和无人机轨迹进行联合设计。文献[22]提出了一种无人机辅助的节能方式,仅为地面用户提供信息服务。文献[23]在确保数据接收和所需3D定位性能的前提下,对所有地面设备中最大能耗的最小化进行研究。文献[24]研究了作为空中基站的无人机3D部署问题,并提出了一种实现能源和成本高效的方法。文献[25]研究无人机无线通信系统,其中通过规划无人机轨迹实现确保信息保密性的能源效率最大化。文献[26]研究无人机与地面成本加权总和的最小化问题,并考虑了地面用户唤醒时间的分配。上述文献均只研究了相关节能问题中的信息传输。

鉴于无人机的强机动性和携能传输技术的巨大潜力,无人机辅助的携能传输系统已经引起了广泛研究。文献[27]讨论了无人机辅助的携能传输应急通信框架,其中无人机将能量传递给地面节点,地

面节点将信息传输给无人机。文献[28]讨论所有地面用户接收信息速率最小者的最大化,其中地面节点需要满足收集能量需求。文献[29]研究了无人机辅助的携能传输网络的信息和能量覆盖问题。文献[30]讨论了无人机辅助的多用户中继系统,实现地面用户收集能量的最大化,并满足信息服务质量。文献[31]讨论了一个无人机辅助反向散射的通信网络,没有优化携能传输的时间分配比。文献[32]研究了一种多输入多输出无线广播系统,其中一个接收器不能同时收集能量和接收信息。然而,上述文献都没有考虑节能的场景,所以有必要对物联网中高效节能的无人机多用户携能传输展开研究。针对无人机辅助无线通信系统中的能耗效率问题,本文研究了高效节能的无人机辅助多用户的携能传输问题,其中旋翼无人机同时向地面设备传递能量和发送信息。另外,为节约地面设备的能耗,对地面设备的唤醒/休眠时间也进行调度设计。

1 场景描述与系统建模

1.1 系统模型

考虑旋翼无人机向 K 个物联网地面设备同时传递能量和传输信息。旋翼无人机可以进行盘旋,地面设备均保持静止。为了适用于一般场景,在理论计算中,假设存在 M 架无人机,如图 1 所示。第 k 个地面设备包含在集合 $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$ 中,第 m 架无人机包含在集合 $M = \{1, 2, \dots, m, \dots, M\}$ 中。无人机向 K 个地面设备同时进行能量传递和信息传输。为保证实施两项任务的有效性,设置固定的飞行时长,表示为 $T \in (0, T]$ 。将时间 T 分割成 N 个时隙,则每个时隙的长度为 $\delta_0 = T/N$ 。任意时隙 n 包含在集合 $N = \{1, 2, \dots, n, \dots, N\}$ 中。因为每个时隙都足够小,所以在每个时隙中,无人机的位置可视为固定。第 k 个地面设备的三维位置表示为 $(\mathbf{w}_k, 0)$,其中 $\mathbf{w}_k = (x_k, y_k)$ 。假设每架无人机均在固定高度 H 飞行,则在第 n 个时隙,第 m 架无人机的三维位置可表示为 $(\mathbf{q}_m^U[n], H)$,其中 $\mathbf{q}_m^U[n] = (x_m^U[n], y_m^U[n])$ 是该无人机投影到地面的水平坐标位置。每架无人机的起飞位置 \mathbf{q}_I 和着陆位置 \mathbf{q}_F 投射到地面的水平坐标位置分别为

$$C1: \mathbf{q}_m^U[0] = \mathbf{q}_I, \quad \mathbf{q}_m^U[N] = \mathbf{q}_F \tag{1}$$

1.2 无人机-地面信道模型

在第 n 个时隙,第 m 架无人机与第 k 个地面设备之间的距离为 $d_{m,k}[n] = \sqrt{\|\mathbf{q}_m^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2 + H^2}$, $\forall m, k, n$ 。

在第 n 个时隙,第 m 架无人机的飞行速度 $\mathbf{v}_m^U[n]$ 满足以下条件

$$C2: \|\mathbf{v}_m^U[n]\| = \frac{\|\mathbf{q}_m^U[n] - \mathbf{q}_m^U[n-1]\|}{\delta_0} \leq V_{\max} \quad \forall m, n \tag{2}$$

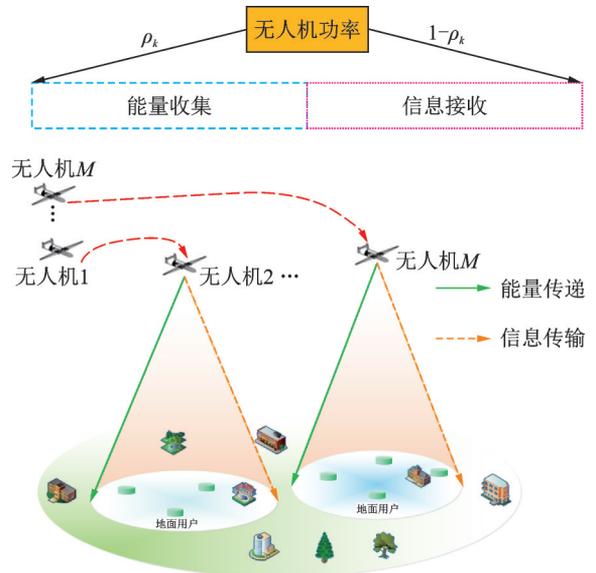


图 1 节能的无人机辅助多用户携能传输的示意图
Fig.1 Illustration of energy-efficient UAV-assisted multiuser SWIPT

式中 V_{\max} 为无人机被允许的最大飞行速度。在第 n 个时隙, 第 m 架无人机的发射功率 $p_m[n]$ 需满足以下限制

$$\text{C3: } \sum_{n=1}^N p_m[n] \leq P_{\max} \quad \forall m \quad (3)$$

式中 P_{\max} 为无人机整个飞行过程中的整体发射功率预算。

在整个飞行时间 T 内, 每架无人机采用时分多址 (Time division multiple access, TDMA) 协议进行携能传输, 其中每个地面设备只能被其相关联的无人机唤醒并开启接收信息和收集能量任务。假设在第 n 个时隙, 第 m 架无人机与第 k 个地面设备之间的信道增益表示为

$$h_{m,k}[n] = \sqrt{\beta_{m,k}[n]} \tilde{h}_{m,k}[n] \quad \forall m, k, n \quad (4)$$

式中: $\beta_{m,k}[n]$ 代表第 n 个时隙, 第 m 架无人机与第 k 个地面设备之间的大尺度衰落, 它和无人机与地面设备之间的距离有关, 即 $\beta_{m,k}[n] = \beta_0 d_{m,k}^{-\alpha}[n]$, $\forall m, k, n$, 其中 β_0 为单位距离的信道增益, α 为路径衰落因子; $\tilde{h}_{m,k}[n]$ 代表第 n 个时隙, 第 m 架无人机与第 k 个地面设备之间的小尺度衰落, 与环境有关, 表示如下^[33-34]

$$\tilde{h}_{m,k}[n] = \sqrt{\frac{K_c}{K_c + 1}} \bar{g} + \sqrt{\frac{1}{K_c + 1}} \tilde{g} \quad \forall m, k, n \quad (5)$$

式中: K_c 为莱斯因子; \bar{g} 为确定的视距信道链路参数, 满足 $|\bar{g}| = 1$; \tilde{g} 为随机分布参数, 是一个零均值单位方差圆对称复高斯随机变量。 $\tilde{h}_{m,k}[n]$ 满足限制条件 $E[|\tilde{h}_{m,k}[n]|^2] = 1$ 和 $\text{Var}(\tilde{h}_{m,k}[n]) = \frac{1}{K_c + 1}$ 。在无人机实际飞行中, 安装在无人机上的接收器可以很好地估计信道状态信息 (Channel state information, CSI)^[26]。无人机在给地面设备发射信号时会把信道状态信息发送给它们。每个地面设备均配备功率分割器, 采用功率分割 (Power splitting, PS) 方式来实现同时能量传递和信息传输的功能。对于第 k 个地面设备, 所接收到功率的比率 ρ_k 分配给信息接收器, 剩下比率 $1 - \rho_k$ 则分配给能量收集器^[32], 并满足

$$\text{C4: } 0 \leq \rho_k \leq 1 \quad \forall k \quad (6)$$

由此, 在第 n 个时隙, 第 k 个地面设备收集到的能量为^[35-36]

$$\hat{Q}_{m,k}[n] = \eta (1 - \rho_k) p_m[n] |h_{m,k}[n]|^2 \quad \forall m, k, n \quad (7)$$

式中 $0 \leq \eta \leq 1$ 是地面设备整流管内的能量转换效率, 并假设每个地面设备的数值相同。

第 n 个时隙, 第 m 架无人机与第 k 个地面设备之间可实现的信息速率表示为

$$\hat{R}_{m,k}[n] = B \log_2 \left(1 + \frac{\rho_k p_m[n] |h_{m,k}[n]|^2}{\sum_{j=1, j \neq m}^M p_j[n] |h_{j,k}[n]|^2 + B\sigma^2} \right) \quad \forall m, k, n \quad (8)$$

式中: B 为信道总带宽; σ^2 为加性高斯白噪声的功率密度。因为每架无人机发射的功率都可用于能量收集, 所以能量采集和信息接收不同, 不存在干扰。 $\sum_{j=1, j \neq m}^M p_j[n] |h_{j,k}[n]|^2$ 是在第 n 个时隙, 第 k 个地面设备接收到除第 m 架无人机外其他无人机的发射信号所产生的干扰。

由于飞行前只有信道分布信息 (Channel distribution information, CDI) 已知, 所以只研究平均信息速率, 表示为 $E[\hat{R}_{m,k}[n]]$ 。同时也只研究平均收集能量, 表示为 $E[\hat{Q}_{m,k}[n]]$ 。地面设备接收器可以接收

信道状态信息, 每架无人机也都可以独立发射信号。进一步, 在第 n 个时隙, 第 k 个地面设备从第 m 架无人机接收到的平均信息速率的下界可表示为^[26,37]

$$E[\hat{R}_{m,k}[n]] \geq B \log_2 \left(1 + \frac{\rho_k p_m[n] E[|h_{m,k}[n]|^2]}{\rho_k p_m[n] \text{Var}(h_{m,k}[n]) + \sum_{j=1, j \neq m}^M \rho_k p_j[n] E[|h_{j,k}[n]|^2] + B\sigma^2} \right) =$$

$$B \log_2 \left(1 + \frac{\rho_k p_m[n] \beta_{m,k}[n]}{\rho_k p_m[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) + \sum_{j=1, j \neq m}^M \rho_k p_j[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2} \right) \triangleq R_{m,k}[n] \quad \forall m, k, n \quad (9)$$

式中 $R_{m,k}[n]$ 是下界, 即最坏情况下的平均信息速率。

在第 n 个时隙, 第 k 个地面设备从第 m 架无人机收集到的平均能量为

$$Q_{m,k}[n] = E[\hat{Q}_{m,k}[n]] = \eta(1 - \rho_k) p_m[n] E[|h_{m,k}[n]|^2] =$$

$$\eta(1 - \rho_k) p_m[n] \beta_{m,k}[n] = \eta(1 - \rho_k) p_m[n] \frac{\beta_0}{\left(H^2 + \|\mathbf{q}_m^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2\right)^{\alpha/2}} \quad \forall m, k, n \quad (10)$$

假设 $\tau_{m,k}[n]$ 是在第 n 个时隙, 第 k 个地面设备接收第 m 架无人机发射信号的时间分配比率。由此, $\tau_{m,k}[n]$ 表示在每个时隙不同地面设备休眠/唤醒时间的分配情况, 以及每架无人机和每个地面设备之间的关联情况。因为每个地面设备通过 TDMA 协议接收信息和收集能量, 所以存在以下约束

$$C5: \sum_{k=1}^K \tau_{m,k}[n] \leq 1 \quad \forall m, n \quad (11)$$

此外, 在每个时隙, 每个地面设备最多与一架无人机相关联, 因此必须满足以下约束

$$C6: \sum_{m=1}^M \tau_{m,k}[n] \leq 1 \quad \forall k, n \quad (12)$$

由于地面设备的能量有限, 所以需要一定数量的能源供应。因此, 每个地面设备都需要获得一定数量的能量才能维持正常工作, 所以需满足以下约束

$$C7: \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 \tau_{m,k}[n] Q_{m,k}[n] \geq J_k \quad \forall k \quad (13)$$

式中 J_k 代表第 k 个地面设备必须收集的能源门限, 假设每个门限值相同。

1.3 能耗模型

一般来说, 每架无人机的能量消耗包括驱动能耗和通信能耗。在许多实际场景中(特别是数据传输/收集), 无人机的通信能耗远低于驱动能耗^[38], 故不考虑通信耗能。第 m 架无人机在整个飞行过程中的能耗近似为^[39]

$$E_m^U[\{\mathbf{q}_m^U[n]\}] \approx \sum_{n=1}^N \delta_0 \left(P_0 + \frac{3P_0 \|\mathbf{v}_m^U[n]\|^2}{U_{\text{tip}}^2} + \frac{1}{2} d_0 \zeta s A \|\mathbf{v}_m^U[n]\|^3 \right) +$$

$$\sum_{n=1}^N \delta_0 P_i \left(\sqrt{1 + \frac{\|\mathbf{v}_m^U[n]\|^4}{4v_0^4}} - \frac{\|\mathbf{v}_m^U[n]\|^2}{2v_0^2} \right)^{1/2} \quad \forall m, n \quad (14)$$

式中: P_0 和 P_i 是两个常量,表示悬停状态时的叶型功率和诱导功率; U_{tip} 为转子叶片的叶尖速度; v_0 为悬停时转子诱导平均速度; d_0 和 s 分别为机身阻力比和转子固体; A 和 ρ 分别表示转子盘区和空气密度。

1.4 问题构建

为了公平起见,本文考虑的是整个飞行过程中每架无人机的平均驱动能耗 $\left(\sum_{m=1}^M E_m^U[\{\mathbf{q}_m^U[n]\}]\right)/M$ 。

为节约能源,不同于以往仅以接收信息量最大化为目标的研究,本系统的目标是所有地面设备中接收信息量最小者与每架无人机平均驱动能耗之间比值,即系统能耗效率的最大化,该比值可表示为 $e_U =$

$$\min_k \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 \tau_{m,k}[n] R_{m,k}[n]}{\left(\sum_{m=1}^M E_m^U[\{\mathbf{q}_m^U[n]\}]\right)/M}。同时,每个地面设备收集的能量必须达到一定的门限。因此,为了描述$$

这种权衡,优化问题的表达式为

$$P(1): \quad \max_{\{\rho_k, \rho_m[n], v_m^U[n], q_m^U[n], \tau_{m,k}[n]\}} e_U \quad \text{s.t. C1} \sim \text{C7} \quad (15)$$

值得注意的是,问题 P(1) 中的优化目标和约束 C7 很复杂,对于优化变量 $\{\rho_k, \rho_m[n], v_m^U[n], q_m^U[n], \tau_{m,k}[n]\}$ 是非凸的,且这些变量是紧密耦合的。所以问题 P(1) 是非凸的,通常难以直接解决。

2 基于连续凸优化的联合优化算法设计

针对问题 P(1),本文提出一个基于连续凸逼近(Successive convex approximation, SCA)和经典 Dinkelbach 方法的交替迭代的高效解决方案。求解 P(1) 的关键思想是将原问题 P(1) 分解为两个子问题:(1)固定无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配,优化无人机发射功率和功率分割比;(2)固定无人机发射功率和功率分割比,优化无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配。

2.1 固定无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配,优化无人机发射功率和功率分割比

在固定的任意可行的无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配 $\{\mathbf{q}_m^U[n], \tau_{m,k}[n]\}$ 下,第一个子问题是联合优化无人机发射功率和功率分割比 $\{p_m[n], \rho_k\}$ 。在此情况下,无人机速度固定,因此每架无人机的平均驱动能耗为常数,表示为 E_{aver}^U ,所以将子优化问题表述为

$$P(2): \quad \max_{\{\rho_k, p_m[n]\}} \frac{\min_k \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 \tau_{m,k}[n] R_{m,k}[n]}{E_{aver}^U} \quad \text{s.t. C3, C4, C7} \quad (16)$$

虽然无人机轨迹 $\mathbf{q}_m^U[n]$ 和地面设备唤醒时间分配 $\tau_{m,k}[n]$ 是固定的,但因为目标函数和约束 C7 都是非凸的,所以问题 P(2) 仍然是非凸优化问题。为了处理目标函数中的非凸项,引入松弛变量 S,满足 $\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 \tau_{m,k}[n] R_{m,k}[n] \geq S, \forall k$,其中 S 是所有地面设备接收信息量的下界。

在给定 ρ_k^r 和 $p_m^r[n]$,利用一阶泰勒展开,对 $(\rho_k + p_m[n])^2$ 进行第 r 次迭代,可得到全局下界

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(\rho_k + p_m[n])^2 - \frac{1}{2}(\rho_k^2 + p_m^2[n]) \geq \frac{1}{2}(\rho_k^r + p_m^r[n])^2 + \\ & (\rho_k^r + p_m^r[n])(\rho_k + p_m[n] - \rho_k^r - p_m^r[n]) - \frac{1}{2}(\rho_k^2 + p_m^2[n]) \end{aligned} \quad (17)$$

式中 : $a_{m,k}^{lb}[n] = \frac{1}{2}(\rho_k^r + p_m^r[n])^2 + (\rho_k^r + p_m^r[n])(\rho_k + p_m[n] - \rho_k^r - p_m^r[n]) - \frac{1}{2}(\rho_k^2 + p_m^2[n])$ 为 $\rho_k p_m[n]$ 的下界。因为 $a_{m,k}^{lb}[n]$ 是关于变量 ρ_k 和 $p_m[n]$ 的凹函数, 所以式(17)是凸的。

引入松弛变量 $b_{m,k}[n]$, 满足 $\rho_k p_m[n] \geq b_{m,k}[n]$, 因此必须满足以下限制条件

$$C8: a_{m,k}^{lb}[n] \geq b_{m,k}[n] \quad \forall m, k, n \tag{18}$$

因为 $R_{m,k}[n]$ 是关于 $\rho_k p_m[n]$ 的一个递增函数, 所以可得到如下表达式

$$R_{m,k}[n] \geq B \log_2 \left(1 + \frac{b_{m,k}[n] \beta_{m,k}[n]}{b_{m,k}[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) + \sum_{j=1, j \neq m}^M b_{j,k}[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2} \right) \tag{19}$$

因为

$$\begin{aligned} & \log_2 \left(1 + \frac{b_{m,k}[n] \beta_{m,k}[n]}{b_{m,k}[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) + \sum_{j=1, j \neq m}^M b_{j,k}[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2} \right) = \\ & \log_2 \left(b_{m,k}[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) + \sum_{j=1}^M b_{j,k}[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2 \right) + \\ & \log_2 \left(\frac{1}{b_{m,k}[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) + \sum_{j=1, j \neq m}^M b_{j,k}[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2} \right) \end{aligned} \tag{20}$$

式中 : $\bar{R}_{m,k}[n] = \log_2 \left(b_{m,k}[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) + \sum_{j=1}^M b_{j,k}[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2 \right)$, $\bar{R}_{m,k}[n]$ 为关于 $b_{m,k}[n]$ 的凹函数。

在给定 $b_{m,k}^r[n]$, 利用一阶泰勒展开, 进行第 r 次迭代, 则得到全局下界

$$\begin{aligned} & \log_2 \left(\frac{1}{b_{m,k}[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) + \sum_{j=1, j \neq m}^M b_{j,k}[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2} \right) \geq \\ & \log_2 \left(\frac{1}{b_{m,k}^r[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) + \sum_{j=1, j \neq m}^M b_{j,k}[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2} \right) - (1/\ln 2) \times \left(1/b_{m,k}^r[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) + \right. \\ & \left. \sum_{j=1, j \neq m}^M b_{j,k}[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2 \right) \times \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1) \times (b_{m,k}[n] - b_{m,k}^r[n]) = \hat{R}_{m,k}[n] \end{aligned} \tag{21}$$

式中 $\hat{R}_{m,k}[n]$ 为关于 $b_{m,k}[n]$ 的线性函数, 所以式(21)是凸的。

同理, 在给定 ρ_k^r 和 $p_m^r[n]$, 利用一阶泰勒展开, 进行第 r 次迭代, 则得到全局下界

$$Q_{m,k}[n] \geq Q_{m,k}^{lb}[n] = \frac{\eta\beta_0}{\left(H^2 + \|\mathbf{q}_m^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2\right)^{\alpha/2}} \times \left(p_m[n] - \frac{1}{2}(\rho_k + p_m[n])^2 + \frac{1}{2}(\rho_k^r + p_m^r[n])^2 + \rho_k^r(\rho_k - \rho_k^r) + p_m^r[n](p_m[n] - p_m^r[n]) \right) \quad (22)$$

式中 $Q_{m,k}^{lb}[n]$ 为关于变量 ρ_k 和 $p_m[n]$ 的凹函数。给定第 r 次迭代的无人机发射功率和功率分割比, 第 $r+1$ 次迭代的无人机发射功率和功率分割比通过求解以下优化问题可得到

$$\begin{aligned} \text{P(3): } \min_{\{\rho_k, p_m[n], S\}} & -\frac{S}{E_{\text{aver}}^U} \\ \text{s.t. } & \begin{cases} \text{C9: } \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 \tau_{m,k}[n] Q_{m,k}^{lb}[n] \geq J_k \quad \forall k \\ \text{C10: } \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 \tau_{m,k} \left(\bar{R}_{m,k}[n] + \hat{R}_{m,k}[n] \right) \geq S \quad \forall k \\ \text{C3, C4, C8} \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

由于问题 P(3) 是凸的, 所以能用标准的凸优化技术和现有的计算工具进行有效地解决^[40]。利用连续凸逼近技术, 通过对问题 P(3) 中局部点 $\{p_m[n], \rho_k\}$ 进行更新迭代优化, 可解决非凸的原问题 P(2)。具体步骤详见算法 1。连续凸逼近方法保证了单调收敛性, 其中算法 1 可以收敛到一个满足问题 P(3) 库恩塔克条件 (Kuhn-Tucker conditions, KKT) 的解。

算法 1 无人机发射功率和功率分割比优化算法

- (1) 初始化: 无人机发射功率 $p_m^r[n]$ 和功率分割比 ρ_k^r 。迭代次数 $r=0$, 设置精度误差 ϵ 。
- (2) 循环:
- (3) 给定局部点 $p_m^r[n]$ 和 ρ_k^r , 求解凸问题 P(3), 得到局部最优值 $p_m^*[n]$ 和 ρ_k^* ;
- (4) 更新局部点 $p_m^{r+1}[n] \leftarrow p_m^*[n], \rho_k^{r+1} \leftarrow \rho_k^*$;
- (5) 更新 $r+1 \leftarrow r$ 。
- (6) 直到收敛到合适的精度误差 ϵ 。

2.2 固定无人机发射功率和功率分割比情况下无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配优化

对于实际中任意给定的无人机发射功率和功率分割比 $\{p_m[n], \rho_k\}$, 第 2 个子问题是无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配 $\{\mathbf{q}_m^U[n], \tau_{m,k}[n]\}$ 的联合优化。将该优化问题可重新表述为

$$\begin{aligned} \text{P(4): } \max_{\{\tau_{m,k}[n], \mathbf{q}_m^U[n], S\}} & \frac{S}{\left(\sum_{m=1}^M E_m^U[\{\mathbf{q}_m^U[n]\}] \right) / M} \\ \text{s.t. } & \begin{cases} \text{C11: } \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 \tau_{m,k}[n] R_{m,k}[n] \geq S \quad \forall k \\ \text{C1, C2, C5, C6, C7} \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

虽然无人机发射功率 $p_m[n]$ 和功率分割比 ρ_k 是固定的, 但因为目标函数、约束 C7 和约束 C11 均是非凸的, 所以问题 P(4) 仍然是非凸的优化问题。为处理约束 C7 中的非凸项, 引入松弛变量 $\mathbf{X} \triangleq \{x_{m,k}[n] \geq 0\}$, 满足 $Q_{m,k}[n] \geq x_{m,k}[n], \forall m, n, k$ 。因此, 满足以下约束

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 \tau_{m,k}[n] Q_{m,k}[n] \geq \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 \tau_{m,k}[n] x_{m,k}[n] \quad \forall k \quad (25)$$

为处理目标函数中的非凸项, 引入松弛变量 $O \triangleq \{o_m[n] \geq 0\}$ 。假设 $o_m[n] \leq \left(\sqrt{1 + \frac{\|\mathbf{v}_m^U[n]\|^4}{4v_0^4}} - 1 \right)$

$\left. \frac{\|\mathbf{v}_m^U[n]\|^2}{2v_0^2} \right)^{1/4}$, 可以得到

$$\frac{1}{o_m[n]^4} \leq o_m[n]^4 + \frac{\|\mathbf{v}_m^U[n]\|^2}{v_0^2} \quad (26)$$

进一步, 可得到如下不等式

$$E_m^U[\{\mathbf{q}_m^U[n]\}] \leq \sum_{n=1}^N \delta_0 \left(P_0 + \frac{3P_0 \|\mathbf{v}_m^U[n]\|^2}{U_{\text{tip}}^2} + \frac{1}{2} d_0 \zeta s A \|\mathbf{v}_m^U[n]\|^3 + P_i o_m[n]^2 \right) = E_m^{lb} \quad (27)$$

由于问题 P(4) 中目标函数是非线性分式规划, 因此可利用 Dinkelbach 方法, 引入参数 λ , 将问题 P(4) 中的目标函数转化成^[41-42]

$$\begin{aligned} & \max_{\{\tau_{m,k}[n], \mathbf{q}_m^U[n], S, \lambda\}} \lambda \\ & \text{s.t.} \quad \frac{S}{E_m^{lb}/M} - \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (28)$$

重组限制条件, 问题(28)可转化成

$$\begin{aligned} & \max_{\{\tau_{m,k}[n], \mathbf{q}_m^U[n], S, \lambda\}} \lambda \quad \text{s.t.} \quad f_1 - \lambda f_2 \geq 0 \end{aligned} \quad (29)$$

式中 $f_1 = S, f_2 = E_m^{lb}/M$ 。

为找到参数的最优值 λ , 利用二分法, 并将目标函数重新构造, 有

$$\max_{\{\tau_{m,k}[n], \mathbf{q}_m^U[n], S, \lambda\}} F(\lambda) = f_1 - \lambda f_2 \quad (30)$$

可以看出式(30)中的目标函数为凹函数, 是连续的且随着 λ 严格递减。

在第 r 次迭代中, 利用一阶泰勒展开式可得到

$$\begin{aligned} o_m[n]^4 + \frac{\|\mathbf{v}_m^U[n]\|^2}{v_0^2} & \geq o_m^r[n]^4 + 4(o_m^r[n])^3(o_m[n] - o_m^r[n]) + \\ & \frac{\|(\mathbf{v}_m^U[n])^r\|^2}{v_0^2} + 2 \frac{(\mathbf{v}_m^U[n])^r}{v_0^2} (\mathbf{v}_m^U[n] - (\mathbf{v}_m^U[n])^r) \triangleq f_m[n] \quad \forall m, n \end{aligned} \quad (31)$$

式中 $f_m[n]$ 为一个关于变量 $o_m[n]$ 和 $\mathbf{v}_m^U[n]$ 的线性函数。

在第 r 次迭代中, 因为

$$(\tau_{m,k}[n] + y_{m,k}[n])^2 \geq -(\tau_{m,k}^r[n] + y_{m,k}^r[n])^2 + 2(\tau_{m,k}^r[n] + y_{m,k}^r[n])(\tau_{m,k}[n] + y_{m,k}[n]) \quad \forall m, k, n \quad (32)$$

$$(\tau_{m,k}[n] + x_{m,k}[n])^2 \geq -(\tau_{m,k}^r[n] + x_{m,k}^r[n])^2 + 2(\tau_{m,k}^r[n] + x_{m,k}^r[n])(\tau_{m,k}[n] + x_{m,k}[n]) \quad \forall m, k, n \quad (33)$$

所以可得到

$$\tau_{m,k}[n]y_{m,k}[n] = \frac{(\tau_{m,k}[n] + y_{m,k}[n])^2 - (\tau_{m,k}^2[n] + y_{m,k}^2[n])}{2} \geq$$

$$(\tau_{m,k}^r[n] + y_{m,k}^r[n])(\tau_{m,k}[n] + y_{m,k}[n]) - \frac{(\tau_{m,k}^2[n] + y_{m,k}^2[n])}{2} - \frac{(\tau_{m,k}^r[n] + y_{m,k}^r[n])^2}{2} = z_{m,k}[n] \quad (34)$$

$$\tau_{m,k}[n]x_{m,k}[n] = \frac{(\tau_{m,k}[n] + x_{m,k}[n])^2 - (\tau_{m,k}^2[n] + x_{m,k}^2[n])}{2} \geq$$

$$(\tau_{m,k}^r[n] + x_{m,k}^r[n])(\tau_{m,k}[n] + x_{m,k}[n]) - \frac{(\tau_{m,k}^2[n] + x_{m,k}^2[n])}{2} - \frac{(\tau_{m,k}^r[n] + x_{m,k}^r[n])^2}{2} = c_{m,k}[n] \quad (35)$$

式中: $z_{m,k}[n]$ 是一个关于 $\tau_{m,k}[n]$ 和 $y_{m,k}[n]$ 的凹函数; $c_{m,k}[n]$ 也是一个关于 $\tau_{m,k}[n]$ 和 $x_{m,k}[n]$ 的凹函数。可得到如下表达式

$$R_{m,k}[n] = B \log_2 \left(\frac{\rho_k p_m[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1)}{K_c + 1} + \sum_{j=1}^M \rho_k p_j[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2 \right) -$$

$$B \log_2 \left(\frac{\rho_k p_m[n] \beta_{m,k}[n] / (K_c + 1)}{K_c + 1} + \sum_{j=1, j \neq m}^M \rho_k p_j[n] \beta_{j,k}[n] + B\sigma^2 \right) =$$

$$\tilde{R}_{m,k}[n] - B \log_2 \left(1 + \frac{\rho_k p_m[n] \beta_0 / (K_c + 1)}{B\sigma^2 (H^2 + \|\mathbf{q}_m^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2)^{a/2}} + \sum_{j=1, j \neq m}^M \frac{\rho_k p_j[n] \beta_0}{B\sigma^2 (H^2 + \|\mathbf{q}_j^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2)^{a/2}} \right) \quad (36)$$

式中

$$\tilde{R}_{m,k}[n] = B \log_2 \left(1 + \frac{\rho_k p_m[n] \beta_0 / (K_c + 1)}{B\sigma^2 (H^2 + \|\mathbf{q}_m^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2)^{a/2}} + \sum_{j=1}^M \frac{\rho_k p_j[n] \beta_0}{B\sigma^2 (H^2 + \|\mathbf{q}_j^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2)^{a/2}} \right) \geq$$

$$\tilde{A}_{m,k}^r[n] - \tilde{I}_{m,k,m}^r[n] \left(\|\mathbf{q}_m^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2 - \|(\mathbf{q}_m^U[n])^r - \mathbf{w}_k\|^2 \right) / (K_c + 1) -$$

$$\tilde{I}_{m,k,m}^r[n] \left(\|\mathbf{q}_m^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2 - \|(\mathbf{q}_m^U[n])^r - \mathbf{w}_k\|^2 \right) \triangleq \tilde{R}_{m,k}^{lb}[n] \quad (37)$$

在式(37)中, $\tilde{A}_{m,k}[n] = B \log_2(\tilde{J}_{m,k}^r[n])$, 其中

$$\tilde{J}_{m,k}^r[n] = 1 + \frac{\rho_k p_m[n] \beta_0 / (K_c + 1)}{B\sigma^2 (H^2 + \|(\mathbf{q}_m^U[n])^r - \mathbf{w}_k\|^2)^{a/2}} + \frac{\rho_k p_m[n] \beta_0}{B\sigma^2 (H^2 + \|(\mathbf{q}_m^U[n])^r - \mathbf{w}_k\|^2)^{a/2}} +$$

$$\sum_{j=1, j \neq m}^M \frac{\rho_k p_j[n] \beta_0}{B\sigma^2 (H^2 + \|\mathbf{q}_j^U[n] - \mathbf{w}_k\|^2)^{a/2}} \quad (38)$$

并且

$$\tilde{I}_{m,k,j}^r[n] = \frac{B\rho_k p_j[n] \beta_0 (\alpha/2) \log_2 e}{\tilde{J}_{m,k}^r[n] B\sigma^2 \left(H^2 + \left\| (\mathbf{q}_j^U[n])^r - \mathbf{w}_k \right\|^2 \right)^{(1+\alpha/2)}} = \frac{\rho_k p_j[n] \beta_0 (\alpha/2) \log_2 e}{\tilde{J}_{m,k}^r[n] \sigma^2 \left(H^2 + \left\| (\mathbf{q}_j^U[n])^r - \mathbf{w}_k \right\|^2 \right)^{(1+\alpha/2)}} \quad (39)$$

因此,可通过解决以下表述问题,更新优化变量 $\{\mathbf{q}_m^U[n], \tau_{m,k}[n]\}$:

$$\begin{aligned} \text{P(5):} \quad & \max_{\{\tau_{m,k}[n], \mathbf{v}_m^U[n], \mathbf{q}_m^U[n], o_m[n], y_{m,k}[n], x_{m,k}[n], S, \lambda\}} f_1 - \lambda f_2 \\ \text{s.t.} \quad & \left\{ \begin{array}{l} \text{C12: } \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 c_{m,k}[n] \geq J_k \quad \forall k \\ \text{C13: } \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_0 z_{m,k}[n] \geq S \quad \forall k \\ \text{C14: } f_m[n] \geq \frac{1}{o_m[n]^4} \quad \forall m, n \\ \text{C15: } o_m[n] \geq 0 \quad \forall m, n \\ \text{C16: } \tilde{R}_{m,k}^{lb}[n] - B \log_2 \left(1 + \frac{\rho_k p_m[n] \beta_0 / (K_c + 1)}{B\sigma^2 (H^2 + g_{m,k}[n])^{\alpha/2}} + \right. \\ \quad \left. \sum_{j=1, j \neq m}^M \frac{\rho_k p_j[n] \beta_0 / (K_c + 1)}{B\sigma^2 (H^2 + g_{j,k}[n])^{\alpha/2}} \right) \geq y_{m,k}[n] \quad \forall m, k, n \\ \text{C17: } Q_{m,k}^{lb}[n] \geq x_{m,k}[n] \quad \forall m, k, n \\ \text{C1, C2, C5, C6} \end{array} \right. \quad (40) \end{aligned}$$

式中 $g_{j,k}[n] = \left\| \mathbf{q}_j^U[n] - \mathbf{w}_k \right\|^2$ 。

由于问题P(5)是凸的,所以它能被标准的凸优化技术直接解决^[40]。利用连续凸逼近技术,问题P(5)中局部点 $\{\mathbf{q}_m^U[n], \tau_{m,k}[n]\}$ 进行更新迭代,进而解决非凸的原问题P(4)。具体步骤详见算法2。同理,连续凸逼近方法保证了单调收敛性,而且算法2也可以收敛到一个满足问题P(5)的KKT条件的解。

算法2 无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配优化算法

- (1) 初始化:无人机轨迹 $(\mathbf{q}_m^U[n])^r$ 和地面设备唤醒时间 $\tau_{m,k}^r[n]$ 。迭代次数 $r=0$,设置精度误差 ϵ 。
- (2) 循环:
- (3) 给定局部点 $(\mathbf{q}_m^U[n])^r$ 和 $\tau_{m,k}^r[n]$,求解凸问题P(5),得到局部最优值 $(\mathbf{q}_m^U[n])^*$ 和 $\tau_{m,k}^*[n]$;
- (4) 更新局部点 $(\mathbf{q}_m^U[n])^{r+1} \leftarrow (\mathbf{q}_m^U[n])^*$, $\tau_{m,k}^{r+1}[n] \leftarrow \tau_{m,k}^*[n]$;
- (5) 更新 $r+1 \leftarrow r$ 。
- (6) 直到收敛到合适的精度误差 ϵ 。

2.3 总体联合优化算法设计

基于2.1节和2.2节,即从原问题P(1)分解出的两个子问题的分析结果,本小节通过交替优化技术,提出了一个求解问题P(1)最优解的总体算法,具体步骤详见算法3。总体而言,两组变量 $\{p_m[n], \rho_k\}$ 和 $\{\mathbf{q}_m^U[n], \tau_{m,k}[n]\}$,利用交替迭代,直到目标函数值收敛到适当精度误差。

算法3 无人机发射功率、功率分割比和无人机轨迹、唤醒时间分配的联合优化算法

- (1) 初始化: 无人机发射功率 $p_m^r[n]$ 、功率分割比 ρ_k^r 和无人机轨迹 $(\mathbf{q}_m^U[n])^r$ 、地面设备唤醒时间 $\tau_{m,k}^r[n]$ 。迭代次数 $r=0$, 设置精度误差 ϵ 。
- (2) 循环:
- (3) 给定局部点 $p_m^r[n], \rho_k^r, (\mathbf{q}_m^U[n])^r, \tau_{m,k}^r[n]$, 用算法1求解凸问题P(3), 得到局部最优值 $p_m^{r+1}[n]$ 和 ρ_k^{r+1} ;
- (4) 给定局部点 $p_m^{r+1}[n], \rho_k^{r+1}, (\mathbf{q}_m^U[n])^r, \tau_{m,k}^r[n]$, 用算法2求解凸问题P(5), 得到局部最优值 $(\mathbf{q}_m^U[n])^{r+1}$ 和 $\tau_{m,k}^{r+1}[n]$;
- (5) 更新 $r+1 \leftarrow r$ 。
- (6) 直到收敛到合适的精确误差 ϵ 。

2.3.1 收敛性分析

假设问题P(1)目标函数记为 O_f 。从算法1的步骤(3~4)可以看出, 算法1是单调不递减的, 表示为

$$O_f\left\{p_m^r[n], \rho_k^r, (\mathbf{q}_m^U[n])^r, \tau_{m,k}^r[n]\right\} \leq O_f\left\{p_m^{r+1}[n], \rho_k^{r+1}, (\mathbf{q}_m^U[n])^r, \tau_{m,k}^r[n]\right\} \quad (41)$$

同理, 从算法2的步骤(3~4)中可以推断出, 算法2也是单调非递减的, 所以它可以表示为

$$O_f\left\{p_m^r[n], \rho_k^r, (\mathbf{q}_m^U[n])^r, \tau_{m,k}^r[n]\right\} \leq O_f\left\{p_m^r[n], \rho_k^r, (\mathbf{q}_m^U[n])^{r+1}, \tau_{m,k}^{r+1}[n]\right\} \quad (42)$$

所以将不等式(41)和不等式(42)相结合, 可得出

$$O_f\left\{p_m^r[n], \rho_k^r, (\mathbf{q}_m^U[n])^r, \tau_{m,k}^r[n]\right\} \leq O_f\left\{p_m^{r+1}[n], \rho_k^{r+1}, (\mathbf{q}_m^U[n])^{r+1}, \tau_{m,k}^{r+1}[n]\right\} \quad (43)$$

因此, 不等式(43)保证了算法3的收敛性。

2.3.2 计算复杂性分析

算法1中, 无人机发射功率与功率分割比联合优化的复杂度可粗略表示 $O(L_1 M^{3.5} K^{3.5} N^{3.5}) \times \log(1/\epsilon)^{[43]}$, 其中 L_1 是算法1的迭代次数。同理, 算法2中无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配联合优化的复杂度为 $O(L_2 M^{3.5} K^{3.5} N^{3.5}) \log(1/\epsilon)$, 其中 L_2 为算法2的迭代次数。综上所述, 整体优化算法的复杂度可以近似为 $O(L_0 L_1 M^{3.5} K^{3.5} N^{3.5}) \log(1/\epsilon) + O(L_0 L_2 M^{3.5} K^{3.5} N^{3.5}) \log(1/\epsilon)$, 其中 L_0 为算法3的总迭代次数。

3 仿真结果

本节对系统能耗指标, 即所有地面设备接收信息最小者与每架无人机平均驱动能耗之间的比值进行仿真实验, 利用仿真结果来评估所提解决算法的性能。

3.1 参数设置

在本文的仿真中, 无人机的数量 $M=1$, 地面设备的数量是 $N=4$, 并且随机均匀分布在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的正方形区域内。首先, 假设 $\mathbf{q}_I=(0, 0)$, $\mathbf{q}_F=(100, 100)$ 。为便于说明, 下面所示的仿真结果是基于具体位置的地面设备来实现的。根据文献[26, 44], 设置莱斯因子 $K_c=20$ 。对于旋翼无人机的驱动耗能^[26, 39], 设置 $P_0=79.86$, $P_i=88.63$, $A=0.503$, $\rho=1.225$, $s=0.05$, $d_0=0.6$, $U_{\text{tip}}=120$, 收敛精度 $\epsilon=10^{-4}$ 。仿真中采用的其他参数如表1所示。

3.2 系统性能

首先,研究算法3的收敛性。如图2所示,在3种不同能量门限下,能耗效率收敛良好。它与2.3.1节的理论分析结论一致。而且,随着能量门限的降低,系统能耗效率增加。原因是采取了功率分割的方式进行携能传输,能量采集部分分配的功率越少,信息接收部分分配的功率就越多。

为验证所提算法的有效性和优越性,本文选用了两种对比算法。算法1是固定无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配,联合优化无人机发射功率和功率分割比,其中无人机分配在相邻地面设备之间的飞行时间相等,并且飞行速度恒定。算法2是固定无人机发射功率与功率分割比,联合优化无人机轨迹和地面设备唤醒时间分配,其中在飞行持续时间内,无人机发射功率分配给接收信息和收集能量的比率等分。由图3(a)和图3(b)可以看出,相较于算法1和算法2,基于所提算法3可获得更大的显著收益。

为表明所提算法的有效性跟地面设备的位置分布无关,本文研究了物联网中地面设备的两种随机分布,如图4所示,分别为实心绿色三角形和实心紫色矩形。在两个场景的飞行持续期间,无人机都是从起点起飞,然后穿过每个地面设备的正上空,最后在终点着陆。为了避免浪费无人机驱动能量,当无人机离开一个地面设备时,它会以直线飞向另一个地面设备。因为无人机与地面设备之间的距离越小,它们之间的信道质量越好。所以,地面设备为了能接收更多信息并收集更多能量,无人机依次按顺序靠近每一个地面设备。

图5显示了在 $J_k = 1 \times 10^{-8} \text{mJ}$ 和 $J_k = 4 \times 10^{-8} \text{mJ}$ 条件下无人机发射功率、无人机飞行速度、地面设备唤醒时间

表1 仿真参数设定

Table 1 Simulation parameter setting

符号	定义	数值
H	无人机固定飞行高度/m	10
P_{\max}	无人机最大发射功率预算/W	1
T	无人机飞行时长/s	50
δ_0	每个时隙的长度/s	0.5
β_0	单位距离的信道增益/dB	-60
α	路径衰落因子	2.3
η	能量转换效率	0.5
B	信道总带宽/MHz	1
σ^2	噪声的功率密度/(dBm·Hz ⁻¹)	-110
V_{\max}	无人机最大飞行速度/(m·s ⁻¹)	10/20

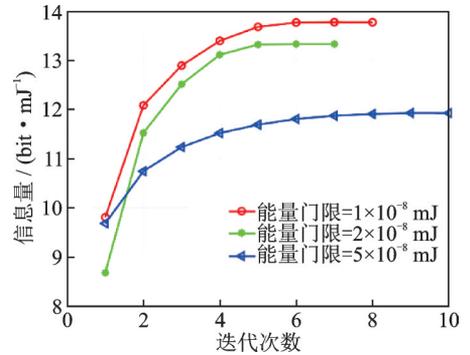


图2 本文算法3的迭代收敛性

Fig.2 Convergence of the proposed Algorithm 3 with iterations

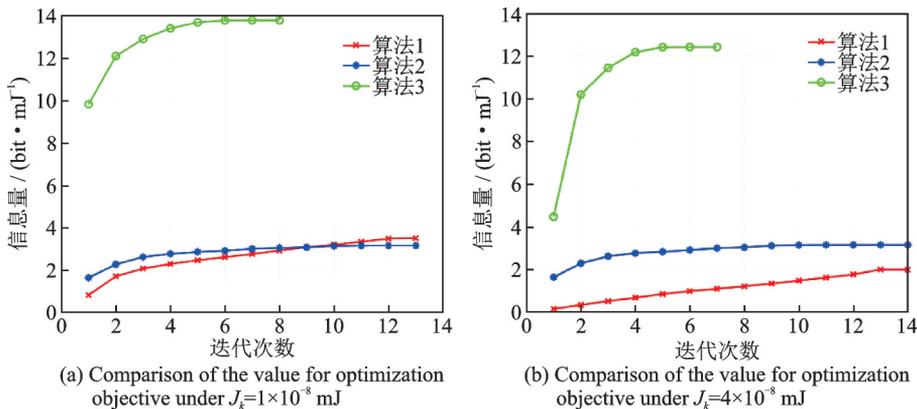


图3 在 $J_k = 1 \times 10^{-8} \text{mJ}$ 和 $J_k = 4 \times 10^{-8} \text{mJ}$ 下的系统能耗效率对比情况

Fig.3 Comparison of the system energy efficiency under $J_k = 1 \times 10^{-8} \text{mJ}$ and $J_k = 4 \times 10^{-8} \text{mJ}$, respectively

分配的分布。为表明无人机被允许的最大飞行速度不影响它们的分布,分别设置 $V_{\max} = 10 \text{ m/s}$ 和 $V_{\max} = 20 \text{ m/s}$ 进行仿真实验。由图 5(a)和图 5(b)可看出,无人机飞行时几乎不发射信号,只有当它接近任意地面设备时才会以较大发射功率来传输信号。因为无人机发射功率开支预算有限,为了让地面设备更有效地接收信号,无人机只有靠近地面设备,即信道状况较好时,才向地面设备发送信号。地面设备才能接收更多信息,同时也才能收集更多能量。此外,由图 5(c)和图 5(d)可得,无人机被允许的最大飞行速度越大,无人机发射功率时的持续时间越长,几乎不发射功率的持续时间越短。还可以看出,无人机在飞行过程中,无论 $V_{\max} = 10 \text{ m/s}$ 还是 $V_{\max} = 20 \text{ m/s}$,它都几乎以最大速度飞行。但当无人机被允许的最大飞行速度足够大,无人机在飞行过程中可能不会以最大速度飞行。因为速度越大,驱动能耗越大,无人机可能不需要最大飞行速度去到达下一个目标地面设备。另外,当无人机靠近地面设备时,它开始向地面设备发送信号,无人机处于盘旋状态。图 5(e)和图 5(f)是地面设备唤醒时间分配图,它反映了无人机与地面设备的匹配情况和 TDMA 协议的情况。当无人机在某个地面设备附近时,就与该地面设备配对。当目标地面设备满足信息和能量需求时,无人机立刻飞往下一个目标地面设备。无人机一旦离开某个地面设备,靠近下一个地面设备时,无人机与前一个地面设备关联断开,然后与下一个目标地面设备配对。而且,无人机飞行速度更大,无人机到达附近目标地面设备就更快,盘旋时间也更多,即与目标地面设备的匹配时间更长。因为原始问题的优化目标,即所有地面设备中接收信息量最小者与每架无人机平均驱动能耗之间比值的最大化,是对公平性的研究。所以如图 6 所示,每个地面设备的功率分割比相同。而信息接收和能量收集之间却是互相制衡的一个均衡问题。在不同的能量门限下,能量门限越大,分配给信息接收器的功率分割比越小;相反,分配给能量接收器的功率分割比越大。

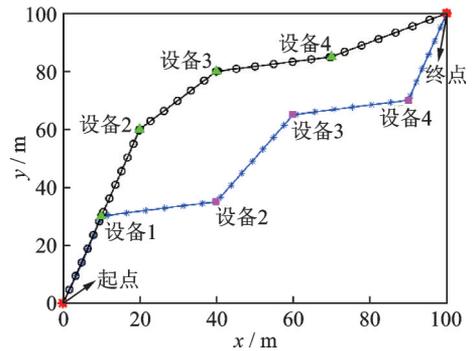


图 4 无人机轨迹:两种随机分布

Fig.4 Trajectories of UAV: Two random distributions

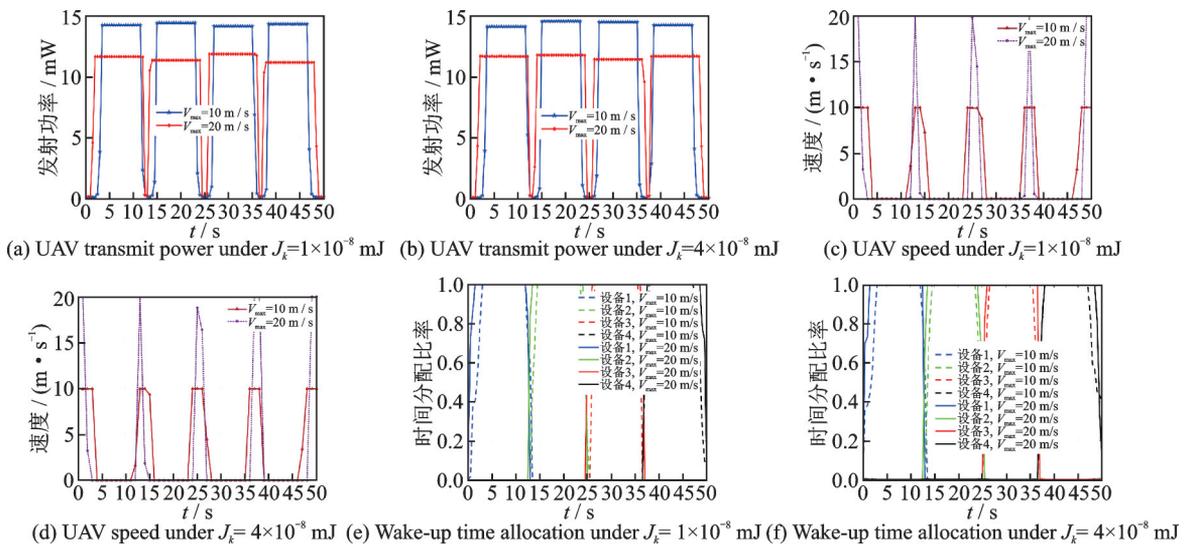


图 5 无人机发射功率、速度和唤醒时间分配

Fig.5 UAV transmit power, speed and wake-up time allocation

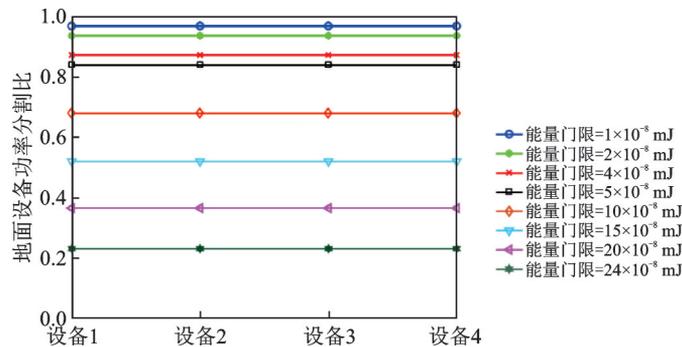


图6 不同能量门限下地面设备的功率分割比

Fig.6 Power splitting ratios of ground devices under different energy thresholds

4 结束语

本文研究了在物联网中高效节能的无人机辅助的多用户携能传输问题,目标是在满足所有地面设备收集能量门限的前提下,系统能耗效率最大化。由于研究的问题是非凸的,很难通过标准的凸优化方法实现直接求解。本文把原始优化问题分解成两个子优化问题,然后利用交替迭代算法联合优化两个子问题,可以收敛到满足KKT条件的解。不同能量门限下的仿真结果证明了所提算法的有效性和优越性。

参考文献:

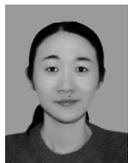
- [1] LOHIYA R, THAKKAR A. Application domains, evaluation data sets, and research challenges of IoT: A systematic review [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 8(11): 8774-8798.
- [2] BITHAS P S, NIKOLAIDIS V, KANATAS A G, et al. UAV-to-ground communications: Channel modeling and UAV selection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 5135-5144.
- [3] 李继广, 陈欣, 李亚娟, 等. 飞翼无人机机动飞行航迹优化和自生成方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(4): 536-547. LI Jiguang, CHEN Xin, LI Yajuan, et al. Flying wing UAV maneuverable flight trajectory optimization and path self-generation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 50(4): 536-547.
- [4] HAN Peng, ZHAO Yifei. An air route planning model of unmanned aerial vehicles under constraints of ground safety[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(2): 298-305.
- [5] 董超, 沈赟, 屈毓铨. 基于无人机的边缘智能计算研究综述[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(3): 227-239. DONG Chao, SHEN Yun, QU Yuben. A survey of UAV-based edge intelligent computing[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(3): 227-239.
- [6] 王睿, 王文灿, 白丽, 等. 基于动态中继选择的无人机自组网协作接入协议[J]. 数据采集与处理, 2022, 37(1): 228-239. WANG Rui, WANG Wencan, BAI Li, et al. Cooperative access protocol for UAV AD-HOC network based on dynamic relay selection[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2022, 37(1): 228-239.
- [7] TAO Z, ZHOU F, WANG Y, et al. Resource allocation and trajectories design for UAV-assisted jamming cognitive UAV networks[J]. China Communications, 2021. DOI: 10.23919/JCC.2021.00.007.
- [8] YIN S, ZHAO Y, LI L, et al. UAV-assisted cooperative communications with time-sharing information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(2): 1554-1567.
- [9] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [10] GU J, WANG H, DING G, et al. Energy-constrained completion time minimization in UAV-enabled Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5491-5503.
- [11] BAEK J, HAN S I, HAN Y. Energy-efficient UAV routing for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular

Technology, 2019, 69(2): 1741-1750.

- [12] COHEN R, KAPCHITS B. An optimal wake-up scheduling algorithm for minimizing energy consumption while limiting maximum delay in a mesh sensor network[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(2): 570-581.
- [13] GU J, SU T, WANG Q, et al. Multiple moving targets surveillance based on a cooperative network for multi-UAV[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(4): 82-89.
- [14] ZENG Y, WU 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.
- [15] WU Q, ZENG Y, ZHANG R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2109-2121.
- [16] GUPTA N, AGARWAL S, MISHRA D. Trajectory design for throughput maximization in UAV-assisted communication system[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 5(3): 1319-1332.
- [17] WANG Y, GAO Z, ZHANG J, et al. Trajectory design for UAV-based internet-of-things data collection: A deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(5): 3899-3912.
- [18] ZHANG G, OU X, CUI M, et al. Cooperative UAV enabled relaying systems: Joint trajectory and transmit power optimization[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 6(1): 543-557.
- [19] JI J, ZHU K, NIYATO D, et al. Joint trajectory design and resource allocation for secure transmission in cache-enabled UAV-relaying networks with D2D communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 8(3): 1557-1571.
- [20] KHODAPARAST S S, LU X, WANG P, et al. Deep reinforcement learning based energy efficient multi-UAV data collection for IoT networks[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2021, 2: 249-260.
- [21] 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.
- [22] ALSHAROA A, YUKSEL M. Energy efficient D2D communications using multiple UAV relays[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(8): 5337-5351.
- [23] WANG Z, LIU R, LIU Q, et al. Energy-efficient data collection and device positioning in UAV-assisted IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 7(2): 1122-1139.
- [24] BABU N, VIRGILI M, PAPADIAS C B, et al. Cost- and energy-efficient aerial communication networks with interleaved hovering and flying[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(9): 9077-9087.
- [25] WANG Q, CHEN Z, LI H. Energy-efficient trajectory planning for UAV-aided secure communication[J]. *China Communications*, 2018, 15(5): 51-60.
- [26] ZHAN C, ZENG Y. Aerial-ground cost tradeoff for multi-UAV-enabled data collection in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 68(3): 1937-1950.
- [27] FENG W, TANG J, YU Y, et al. UAV-enabled SWIPT in IoT networks for emergency communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(5): 140-147.
- [28] KANG J M, CHUN C J. Joint trajectory design, Tx power allocation, and Rx power splitting for UAV-enabled multicasting SWIPT systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 3740-3743.
- [29] JIANG R, XIONG K, YANG H C, et al. On the coverage of UAV-assisted SWIPT networks with nonlinear EH model[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(6): 4464-4481.
- [30] WANG J, LI B, WANG G, et al. Robust design for UAV-enabled multiuser relaying system with SWIPT[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 5(3): 1293-1305.
- [31] YANG G, DAI R, LIANG Y C. Energy-efficient UAV backscatter communication with joint trajectory design and resource optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 20(2): 926-941.
- [32] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [33] ZENG Y, XU X, ZHANG R. Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(4): 2233-2246.
- [34] YOU C, ZHANG R. 3D trajectory optimization in Rician fading for UAV-enabled data harvesting[J]. *IEEE Transactions on*

- Wireless Communications, 2019, 18(6): 3192-3207.
- [35] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 12(1): 288-300.
- [36] KANG J M, KIM I M, KIM D I. Wireless information and power transfer: Rate-energy tradeoff for nonlinear energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 17(3): 1966-1981.
- [37] CAIRE G. On the ergodic rate lower bounds with applications to massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(5): 3258-3268.
- [38] ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(6): 3747-3760.
- [39] 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.
- [40] BOYD S, BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. UC Los Angeles: Cambridge University Press, 2004.
- [41] ISHEDEN C, CHONG Z, JORSIECK E, et al. Framework for link-level energy efficiency optimization with informed transmitter[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(8): 2946-2957.
- [42] YOU F, CASTRO P M, GROSSMANN I E. Dinkelbach's algorithm as an efficient method to solve a class of MINLP models for large-scale cyclic scheduling problems[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(11): 1879-1889.
- [43] LI Q, YANG L. Artificial noise aided secure precoding for MIMO untrusted two-way relay systems with perfect and imperfect channel state information[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2018, 13(10): 2628-2638.
- [44] 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.

作者简介:



黄斐(1992-),女,博士研究生,研究方向:无人机通信、导航,E-mail:huangfe-icjh@sina.com。



李广侠(1964-),男,教授,研究方向:卫星通信、卫星导航。



王海超(1991-),男,副教授,研究方向:无人机通信、凸优化技术。



丁国如(1986-),通信作者,男,教授,研究方向:无线通信。



田世伟(1987-),男,助理研究员,研究方向:卫星通信、卫星导航、协同定位,E-mail:tianxwell@163.com。



蔡敬辉(1991-),男,工程师,研究方向:卫星通信。



宋叶辉(1995-),男,博士研究生,研究方向:无线网络、拓扑推理。

(编辑:刘彦东)