

PT 对称供电结构的无人机无线通信网络 资源分配方法研究

李 然^{1,2} 王玫芬¹

(1. 华北电力大学电子与通信工程系 保定 071003; 2. 华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室 保定 071003)

摘 要: 无人机辅助通信在未来无线通信中应用广泛,将其部署在无线供能通信网络中,可实现对节点的能量传输与信息收集。本文引入基于宇称时间对称原理的磁耦合谐振的无线电能传输方式,并采用双无人机协同工作的供能通信系统。以最大化最小和速率为优化目标,联合优化信息收集无人机的轨迹和节点的功率分配,由于是非凸问题,通过块坐标下降法、加权最小均方误差算法和逐次凸逼近等方法求解。供能无人机采用动态规划算法选取遍历所有节点的最短路径。仿真结果表明,所提联合优化算法收敛性良好,与轨迹规划方案相比,最小和速率提升超 2 倍;与直线飞行方案相比,不同周期下最小和速率分别提升约 10.7% 和 4.2%;与射频供能方案相比,最小和速率提升超 7 倍,证明了本文方案在无人机辅助无线供能通信网络中的适用性。

关键词: 无人机;宇称时间对称;磁耦合无线电能传输;无线供能通信网络;轨迹优化

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Resource allocation for PT-symmetric powered UAV wireless communication networks

Li Ran^{1,2} Wang Meisu¹

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Hebei Province Electric Power Internet of Things Technology Key Laboratory, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: UAV-assisted communication has broad application prospects in future wireless communications. Deploying it in wireless powered communication networks enables energy transmission and information collection for nodes. This paper introduces a magnetic coupling resonant wireless power transfer method based on the parity-time symmetry principle, and adopts a dual-UAV cooperative energy supply communication system. With the goal of maximizing the minimum sum rate, the trajectory of the information-collecting UAV and the power allocation of nodes are jointly optimized. Since this problem is non-convex, it is solved by methods such as the block coordinate descent algorithm, weighted minimum mean square error algorithm, and successive convex optimization. The power-transfer UAV uses a dynamic programming algorithm to select the shortest path traversing all nodes. Simulation results show that the proposed joint optimization algorithm has good convergence. Compared with the trajectory planning scheme, the minimum sum rate is improved by more than 2 times; compared with the straight-line flight scheme, the minimum sum rate is increased by about 10.7% and 4.2% under different cycles, respectively; compared with the radio frequency power transfer scheme, the minimum sum rate is improved by more than 7 times. These results verify the applicability of the proposed scheme in UAV-assisted wireless energy supply communication networks.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAV); parity-time symmetry; magnetic coupling wireless power transfer; wireless powered communication network (WPCN); trajectory optimization

0 引 言

无人机(unmanned aerial vehicles, UAV)辅助通信作

为未来无线通信的关键技术,将在无线通信领域发挥重要作用^[1]。与传统的静态中继相比,无人机在位置和轨迹等参数方面具有更强的可控性,灵活性更高^[2-4]。此外,无人

机与节点之间形成视距链路的可能性更高,二者之间的信道条件往往更好^[5]。无人机系统可对大规模区域覆盖飞行以实现数据采集与传输,从而降低已部署节点的能耗,延长无线供电通信网络设备的生命周期^[6-7]。

无线供电通信网络(wireless powered communication network, WPCN)是一种结合了无线能量传输(wireless power transfer, WPT)和无线信息传输(wireless information transmission, WIT)两者优点的技术,将无人机部署在 WPCN 网络中,在下行链路为节点传输能量,并在上行链路收集节点的数据。无线电能传输是新型电能传输方式研究的重要方向,通常包括电感耦合、磁耦合谐振(magnetic coupling resonance, MCR)和射频(radio frequency, RF)辐射 3 种方式^[8],这一技术具有无接触损耗、方便灵活等一系列优势^[9]。

在无人机供电辅助的无线通信系统中,无人机的飞行轨迹和资源分配策略是影响系统可达和速率的两个主要因素^[10]。对功率分配与无人机轨迹进行联合优化,成为提升系统整体性能的有效途径,国内外学者已围绕这一方向展开诸多探索。文献[11]构建了基于大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术的无人机辅助无线供电系统,将系统能效定义为上行和速率与无人机电能耗的比值,通过无人机轨迹与时隙分配的交替优化策略,实现系统能效的提升;文献[12]针对无人机供电的无线传感器网络,提出无人机高度与定向天线波束宽度的联合优化方案,以最小化数据收集时间为目标优化系统运行效率;文献[13]将无人机引入边缘计算网络进行无线充电的场景,在部分卸载与二进制卸载两种模式下,构建加权和计算位(weighted sum calculation bit, WSCB)最大化模型,通过拉格朗日对偶法、逐次凸逼近等凸优化技术,完成资源分配与轨迹规划的联合求解;文献[14]考虑存在障碍物的无人机辅助无线供电通信网络,通过联合优化无人机飞行轨迹和功率分配,在提高能量利用效率的同时有效降低系统能耗;文献[15]基于无人机使能的集成感知与通信(integrated sensing and communication, ISAC)系统,在满足感知波束方向图增益约束的前提下,通过优化无人机轨迹与多天线波束成形策略,实现用户加权和速率的最大化。然而,当前多数研究基于射频技术实现无人机对节点供电,该技术存在能量传输效率偏低、短时能量供给不足等固有缺陷,且对节点设备的位置要求比较高,这些问题限制了系统性能的进一步提升。

基于磁耦合谐振的 WPT 技术通过磁场耦合发射线圈与接收线圈,在谐振状态下能在一定距离内高效传输能量^[16],凭借其充电方便灵活、安全可靠等优势,在电动汽车、移动电子产品以及医疗设备等领域具有广泛的应用^[17-18]。将该技术应用于双无人机协同辅助通信场景,通过为地面终端配置接收线圈、为其中一架无人机配置发射线圈进行供电,可在保障地面终端与另一无人机通信的同

时,显著提升短时获能效率^[19]。两架无人机承担不同功能,规避了集成式 UAV 系统同时处理双功能的复杂性,并且在成本、性能、适应性和可靠性方面均优于集成式系统^[20]。2017 年,斯坦福大学的学者们首次将宇称-时间(parity-time symmetry, PT)对称概念引入了无线电能传输领域^[21]。PT-WPT 系统可通过调控使其在 PT 对称区域内稳定运行于特定工作状态,当系统参数发生扰动时,系统工作频率会随参数自适应变化。PT-WPT 系统在宽传输范围下能有效抑制传输特性对耦合系数的敏感度,显著提升了 WPT 系统的工程适用性^[22]。

本文采用两架无人机协助供电通信的网络架构,两架无人机功能独立,一架收集节点信息,另一架为节点提供能量。其中一架 UAV 出现故障时可以进行单独维护,相较于单无人机系统降低了整体维护成本;且两架无人机可根据各自任务需求分别进行轨迹规划。在无人及辅助无线供电通信网络中引入 PT-WPT 充电结构,以最大化最小和速率作为优化目标,对信息收集无人机轨迹规划和节点功率分配进行联合优化。同时考虑了能量、初始位置和终点位置约束,采用基于块坐标下降法、加权最小均方误差算法和逐次凸逼近技术将非凸问题转化为近似凸问题。其中的供电无人机采用动态规划算法,基于其对全局的系统性搜索特性,能够在复杂的空间布局 and 任务约束条件下,实现遍历所有节点,选取最短路径。

1 系统模型和问题描述

1.1 系统模型

图 1 所示为一个双无人机无线供电通信系统场景。UAV-A 收集节点 d 的信息,UAV-B 携带磁耦合线圈的发射端,通过采用 PT-WPT 的方式为节点提供能量。节点包含一个可充电的电池和磁耦合线圈的接收端,从 UAV-B 获得能量,利用存储的能量在上行链路中与 UAV-A 进行通信。节点水平坐标 $\mathbf{e}_d = [x_d, y_d]^T, d \in \mathbf{D} = \{1, \dots, D\}$ 。便于分析,假设 UAV-A 在固定高度 H_A 飞行,UAV-B 在固定高度 H_B 飞行,水平位置随时间不断变化。两架无人机在不同高度飞行,不存在发生碰撞情况。

对信息收集 UAV-A,将任务周期 T 划分成相等的 N 份离散化的时间段, N 足够大,UAV 飞行轨迹近似看作是连续的,每个时隙的长度为 $\delta_N = T/N$ 。多个节点同时对无人机进行信息传输时,采用非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)将它们从功率域中分离出来,并提高频谱利用率^[23]。对能量传输无人机 B,采用飞行悬停协议,总周期为飞行时间和悬停进行能量传输的时间之和,记作 $T = T_f + T_h$, T_f 为飞行时间, T_h 为悬停时间。无人机依次经过各个节点,所有相邻节点间的距离和为飞行总路程 s 。由于 UAV-B 以速度 v_B 匀速飞行,因此飞行时间为 $T_f = s/v_B$ 。与单无人机无线供电通信网络相比,双无人机系统可以更高效地传输能量和接收信息。

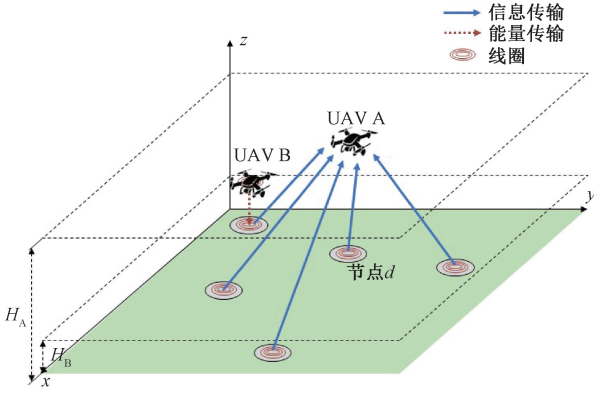


图 1 PT-WPT 无人机辅助的通信模型

Fig. 1 PT-WPT UAV-assisted communication model

在第 $n \in N = \{1, 2, \dots, N\}$ 个时段, UAV-A 的水平坐标可表示为 $\mathbf{q}_i[n] = [x_{q_i}[n], y_{q_i}[n]]^T$ 。无人机的起始位置 $\mathbf{q}_i[1] = \mathbf{q}_i$, 无人机的终点位置 $\mathbf{q}_i[N] = \mathbf{q}_f$, UAV-A 的最大飞行速度为 $v_{\max}^A$ 。因此, UAV-A 的最大速度约束可以表示为:

$$\|\mathbf{q}_i[n+1] - \mathbf{q}_i[n]\|^2 \leq (\nu_{\max}^A \delta_N)^2, n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

1.2 能量传输模型

S-S 型无线电能传输系统的电路模型如图 2(a) 所示。 $-R_N$ 为交流电源, L_P 为发射线圈电感, C_P 为发射端补偿电容, r_P 为发射线圈内阻, L_S 为接收端线圈电感, C_S 为接收端补偿电容, r_S 为接收线圈内阻, R_L 为等效负载电阻, I_P 为流经发射线圈的电流相量, I_S 为流经接收线圈的电流相量, M 为发射线圈和接收线圈之间的互感。

PT 对称描述了系统在空间反演和时间反演联合操作下的不变性。空间反演, 也称宇称操作, 对应于连续空间坐标下的镜像变换, 将空间坐标从 x 映射到 $-x$; 时间反演, 对应于连续时间坐标的反转, 将时间从 t 映射到 $-t$ 。空间分布的镜像变换与时间演化的方向反转相互协同, 使得系统的物理特性保持不变, 即当系统经历时间反演时, 其空间分布的镜像变换等价于时间正向流动时的原始状态, 如图 2 所示。

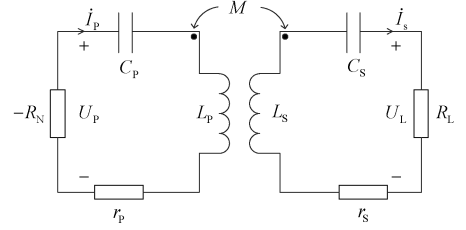
根据图 2(a) 列写 PT 对称 S-S 型拓扑电路方程为:

$$\begin{cases} \left[\frac{1}{j\omega C_P} + j\omega L_P + (r_P - R_N) \right] I_P - j\omega M I_S = 0 \\ \left[\frac{1}{j\omega C_S} + j\omega L_S + (r_S + R_L) \right] I_S - j\omega M I_P = 0 \end{cases} \quad (2)$$

以矩阵形式描述为:

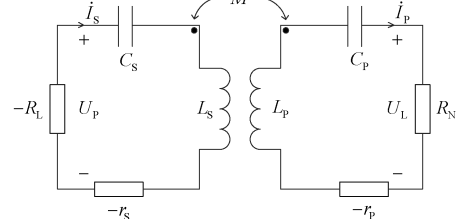
$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_P \\ I_S \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

其中, $Z_{11} = 1/j\omega C_P + j\omega L_P + (r_P - R_N)$, $Z_{12} = Z_{21} = -j\omega M$, $Z_{22} = 1/j\omega C_S + j\omega L_S + (r_S + R_L)$ 。在 MCR-WPT 系统中, 当系统谐振时, 发射端与接收端固有谐振频率相



(a) S-S型MCR-WPT系统拓扑

(a) S-S MCR-WPT system topology



(b) PT反演变换后的S-S型MCR-WPT系统拓扑

(b) Topology of S-S MCR-WPT system after PT inverse evolution

图 2 PT 反演变换 S-S 型拓扑

Fig. 2 Inverse evolution of PT for S-S topology

等^[24], 即 $\omega_0 = \omega_P = 1/\sqrt{L_P C_P} = \omega_S = 1/\sqrt{L_S C_S}$ 。

图 2 中线圈耦合系数为:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_P L_S}} = \frac{\mu_0 \pi a^2 b^2}{2(a^2 + b^2 + c^2)^{\frac{3}{2}} \sqrt{L_P L_S}} \quad (4)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, a 、 b 、 c 分别为原、副边线圈半径和传输距离。

当 $Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21} = 0$ 时, 式(3)存在非零解, 将式(4)代入该等式, 化简后分离实部和虚部可以得到:

$$\begin{cases} -\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\omega k}{\omega_0}\right)^2 + \frac{(r_P - R_N)(r_S + R_L)}{\omega_0^2 L_P L_S} = 0 \\ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) \left(\frac{r_S + R_L}{\omega_0 L_S} + \frac{r_P - R_N}{\omega_0 L_P}\right) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

当 $\omega \neq \omega_0$ 时, 系统工作在 PT 对称非破碎区域, 求得:

$$R_L = \frac{L_S}{L_P} (R_N - r_P) - r_S = \frac{L_S}{L_P} \left(\frac{U_P}{I_P} - r_P \right) - r_S \quad (6)$$

根据式(6)可得: $r_P - R_N = -\frac{L_P}{L_S} (r_S + R_L)$, 代入式(5)

中可得:

$$\omega^2 = \frac{\omega_0^2 \left[2 - \left(\frac{r_S + R_L}{\omega_0 L_S} \right)^2 \pm \sqrt{\left[2 - \left(\frac{r_S + R_L}{\omega_0 L_S} \right)^2 \right]^2 + 4(k^2 - 1)} \right]}{2(1 - k^2)} \quad (7)$$

为保证 ω 有实解, 需满足以下两个条件:

$$\begin{cases} \frac{r_S + R_L}{\omega_0 L_S} \leq \sqrt{2} \\ k \geq \sqrt{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r_S + R_L}{\omega_0 L_S} \right)^2 \right]^2} = k_c \end{cases} \quad (8)$$

其中, k_c 为临界耦合系数, 当 $k > k_c$ 时, 系统处于 PT

对称非破碎态;当 $k = k_c$ 时,系统处于临界耦合状态;当 $k < k_c$ 时,系统处于 PT 对称破碎态。依据输出功率与传输效率的定义,可以推导出系统在 PT 对称非破碎态和临界耦合状态($k \geq k_c$)内,输出功率与传输效率分别为:

$$P_L = \frac{U_p^2 R_L}{\frac{L_p}{L_s}(R_L + r_s)^2 + 2r_p(R_L + r_s) + \frac{L_s}{L_p}r_p^2} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{R_L}{\frac{L_s}{L_p}r_p + r_s + R_L} \quad (10)$$

由式(9)和(10)可以发现,系统输出功率和传输效率与耦合系数无关。系统处于 PT 对称非破碎区域时,输出功率仅与交流电压幅值、等效负载电阻值、发射线圈和接收线圈的电感值及内阻值有关,传输效率仅与等效负载电阻值、发射线圈和接收线圈的电感值及内阻值有关。相较于传统 MCR-WPT 系统,PT-WPT 系统在一定程度上缓解了其传输特性对传输距离的敏感性问题。基于这一优势,该充电结构能够很好地适配本文所构建的能量传输模型。

因此,在周期 T 内,UAV-B 向系统中所有节点传输的总能量为:

$$E = \left(T - \frac{s}{v_e}\right) P_L \quad (11)$$

式(11)表明:除去匀速飞行时间外,UAV-B 均为节点供能。

1.3 信息收集模型

考虑到实际环境,假设 UAV-A 与节点之间的无线通信主要由视距信道主导。因此,在时隙 $n \in \mathbf{N}$ 内,UAV-A 与节点 $d \in \mathbf{D}$ 之间的平均信道增益 $h_d[n]$ 遵循自由空间路径损耗模型,可表示为:

$$h_d[n] = \frac{\beta_0}{\|\mathbf{q}_1[n] - \mathbf{e}_d\|^2 + H_A^2} \quad (12)$$

其中, β_0 为 1 m 距离的信道参考增益。

d 个节点同时向 UAV-A 传输信息,UAV-A 除了接收第 d 个节点传输的有用信息,还会受到其余 $(d-1)$ 个节点的信号干扰,因此在第 $n \in \mathbf{N}$ 个时隙内第 d 个节点处的信噪比为:

$$\gamma_d[n] = \frac{p_d[n]h_d[n]}{\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n]h_l[n] + \sigma^2} \quad (13)$$

其中, $p_d[n]$ 表示第 d 节点在第 n 个时隙向 UAV-A 传输信息的传输功率, σ^2 表示接收端处的加性高斯白噪声(additive white gaussian noise, AWGN)的方差。

在第 $n \in \mathbf{N}$ 个时隙内第 d 个节点的可达发送速率表示为:

$$R_d[n] = \log_2 \left(1 + \frac{p_d[n]h_d[n]}{\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n]h_l[n] + \sigma^2} \right) \quad (14)$$

得到系统中的能量约束:

$$\sum_{n=1}^N \delta_N p_d[n] \leq E \quad (15)$$

即节点下行信息传输消耗的能量和需小于节点上行能量传输收集到的能量。

1.4 问题建模

本文联合优化轨迹和上行功率来最大化节点的最小和速率。引入优化变量 $R_{\min}$ 来表示节点的和速率:

$$\sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{p_d[n]h_d[n]}{\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n]h_l[n] + \sigma^2} \right) \geq R_{\min} \quad (16)$$

整体优化问题可以描述为:

$$\text{P1: } \max_{R_{\min}, \{\mathbf{q}_1[n]\}, \{p_d[n]\}} R_{\min} \quad (17)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^N R_d \geq R_{\min}, \quad d \in \mathbf{D} \quad (18)$$

$$0 \leq p_d[n] \leq P_{\max}, \quad d \in \mathbf{D}, n \in \mathbf{N} \quad (19)$$

$$\sum_{n=1}^N \delta_N p_d[n] \leq E, \quad d \in \mathbf{D} \quad (20)$$

$$\mathbf{q}_1[1] = \mathbf{q}_1 \quad (21)$$

$$\mathbf{q}_1[N] = \mathbf{q}_F \quad (22)$$

$$\|\mathbf{q}_1[n+1] - \mathbf{q}_1[n]\|^2 \leq (\nu_{\max}^{\Delta} \delta_N)^2, \quad n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (23)$$

其中,式(17)和(18)表示优化目标是最大化节点最小和速率,式(19)为节点信息发射功率 $p_d[n]$ 的约束,式(21)和(22)表示无人机起始位置和终点位置的限制。

考虑到变量间的耦合性及约束条件式(18)的非凸性,该优化问题整体呈现非凸特性,直接求解面临较大挑战。本文采用一种基于块坐标下降法、加权最小均方误差算法和逐次凸逼近算法的方法来对该问题进行求解。

2 算法分析

采用块坐标下降法,将原优化问题转化成 2 个子问题:子问题 1 固定节点发射功率,优化 UAV-A 的飞行轨迹;子问题 2 固定 UAV-A 的飞行轨迹,优化节点的发射功率。在每次迭代时依次优化 2 个子问题。针对子问题中存在的非凸约束,采用逐次凸逼近方法,通过迭代将非凸问题转换为近似凸优化问题,并使用凸优化工具 CVX 进行求解,逐步逼近原问题的最优解。

2.1 优化无人机轨迹

固定节点发射功率分配,UAV-A 轨迹规划问题可表述为:

$$\text{P2: } \max_{R_{\min}, \{\mathbf{q}_1[n]\}} R_{\min} \quad (24)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{p_d[n]h_d[n]}{\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n]h_l[n] + \sigma^2} \right) \geq R_{\min}, \quad d \in \mathbf{D} \quad (25)$$

$$\mathbf{q}_1[1] = \mathbf{q}_1 \quad (26)$$

$$\mathbf{q}_1[N] = \mathbf{q}_F \quad (27)$$

$$\| \mathbf{q}_1[n+1] - \mathbf{q}_1[n] \|^2 \leq (\nu_{\max}^{\Lambda} \delta_N)^2, n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (28)$$

由于非凸约束的存在,引入松弛变量 $\{z_d[n]\}, z_d[n] = \|\mathbf{q}_1[n] - \mathbf{e}_d\|^2 + H_{\Lambda}^2$ 。其中 $\|\mathbf{q}_1[n] - \mathbf{e}_d\|^2$ 是关于 $\mathbf{q}_1[n]$ 的凸函数, $\mathbf{q}_1^c[n]$ 为第 c 次迭代时的局部最优轨迹,对 $z_d[n]$ 在 $\mathbf{q}_1^c[n]$ 处进行一阶泰勒展开:

$$z_d[n] \geq z_d^c[n] + 2(\mathbf{q}_1^c[n] - \mathbf{e}_d)^T(\mathbf{q}_1[n] - \mathbf{q}_1^c[n]) \quad (29)$$

其中:

$$z_d^c[n] = H_{\Lambda}^2 + \|\mathbf{q}_1^c[n] - \mathbf{e}_d\|^2 \quad (30)$$

$R_d[n]$ 可以两个对数函数相减的形式表示:

$$R_d[n] = \log_2 \left(\sum_{d=1}^D p_d[n] h_d[n] + \sigma^2 \right) - \log_2 \left(\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n] h_l[n] + \sigma^2 \right) \quad (31)$$

记为:

$$R_d[n] = R'_d[n] - \log_2 \left(\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n] h_l[n] + \sigma^2 \right) \quad (32)$$

$R'_d[n]$ 对 $\|\mathbf{q}_1[n] - \mathbf{e}_d\|$ 是凸的,因此,在已知的第 c 次迭代所得的无人机轨迹点 $\mathbf{q}_1^c[n]$ 处进行一阶泰勒展开,可以得出 $R'_d[n]$ 的下界:

$$R'_d[n] \geq \log_2 \left(\sum_{d=1}^D p_d[n] h_d^c[n] + \sigma^2 \right) - \sum_{d=1}^D \frac{p_d[n] \beta_0 \log_2(e)}{\left(\sum_{i=1}^D p_i[n] h_i^c[n] + \sigma^2 \right) (z_d^c[n])^2} (z_d[n] - z_d^c[n]) = R_d^{\text{lb}}[n] \quad (33)$$

将 $z_d[n] - z_d^c[n] = \|\mathbf{q}_1[n] - \mathbf{e}_d\|^2 - \|\mathbf{q}_1^c[n] - \mathbf{e}_d\|^2$ 进行一阶泰勒展开,并忽略二阶项,得到:

$$z_d[n] - z_d^c[n] \approx 2(\mathbf{q}_1^c[n] - \mathbf{e}_d)^T(\mathbf{q}_1[n] - \mathbf{q}_1^c[n]) \quad (34)$$

进一步化简得到:

$$R_d^{\text{lb}}[n] = \log_2 \left(\sum_{d=1}^D p_d[n] h_d^c[n] + \sigma^2 \right) - \sum_{d=1}^D \frac{p_d[n] \beta_0 \log_2(e)}{\left(\sum_{i=1}^D p_i[n] h_i^c[n] + \sigma^2 \right) (z_d^c[n])^2} [2(\mathbf{q}_1^c[n] - \mathbf{e}_d)^T(\mathbf{q}_1[n] - \mathbf{q}_1^c[n])] \quad (35)$$

将原非凸问题转化为:

$$\text{P3: } \max_{R_{\min}, \{\mathbf{q}_1[n]\}} R_{\min} \quad (36)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^N (R_d^{\text{lb}}[n] - \log_2 \left(\sum_{l=1, l \neq d}^D \frac{\beta_0 p_l[n]}{z_d[n] + H_{\Lambda}^2} + \sigma^2 \right)) \geq R_{\min}, d \in \mathbf{D} \quad (37)$$

$$z_d[n] \leq \|\mathbf{q}_1^c[n] - \mathbf{e}_d\|^2 + 2(\mathbf{q}_1^c[n] - \mathbf{e}_d)^T(\mathbf{q}_1[n] - \mathbf{q}_1^c[n]), d \in \mathbf{D}, n \in \mathbf{N} \quad (38)$$

$$\mathbf{q}_1[1] = \mathbf{q}_1 \quad (39)$$

$$\mathbf{q}_1[N] = \mathbf{q}_F \quad (40)$$

$$\|\mathbf{q}_1[n+1] - \mathbf{q}_1[n]\|^2 \leq (\nu_{\max}^{\Lambda} \delta_N)^2, n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (41)$$

P3 已经转化为一个凸问题,可以使用 CVX 进行求解。

2.2 优化节点功率分配

固定 UAV-A 的飞行轨迹,节点发射功率的分配问题可以表示为:

$$\text{P4: } \max_{R_{\min}, \{p_d[n]\}} R_{\min} \quad (42)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{p_d[n] h_d[n]}{\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n] h_l[n] + \sigma^2} \right) \geq R_{\min}, d \in \mathbf{D} \quad (43)$$

$$0 \leq p_d[n] \leq P_{\max}, d \in \mathbf{D}, n \in \mathbf{N} \quad (44)$$

$$\sum_{n=1}^N \delta_N p_d[n] \leq E, d \in \mathbf{D} \quad (45)$$

根据二次变换的原理^[25],引入辅助变量 β ,将信干噪比表示为:

$$\gamma_d[n] = 2\beta \sqrt{p_d[n] h_d[n]} - \beta^2 \left(\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n] h_l[n] + \sigma^2 \right) \quad (46)$$

求得 β 的最优闭式解为:

$$\beta^* = \frac{\sqrt{p_d[n] h_d[n]}}{\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n] h_l[n] + \sigma^2} \quad (47)$$

节点 d 在时隙 n 的均方误差为:

$$g_d[n] = \beta^2 \left(\sum_{l=1, l \neq d}^D p_l[n] h_l[n] + \sigma^2 \right) - 2\beta \sqrt{p_d[n] h_d[n]} + 1 \quad (48)$$

优化问题可以通过加权最小均方误差算法思想进行转化,得到上界:

$$R_d[n] \leq \log_2(\omega_d^c[n]) - \omega_d^c[n] g_d[n] + 1 \quad (49)$$

其中辅助变量与信噪比的关系为: $\omega_d[n] = 1 + \gamma_d[n]$, $\omega_d^c[n]$ 为第 c 次迭代后的结果。

将式(49)进一步改写为:

$$R_d[n] \leq a_d[n] + b_d[n] \sqrt{p_d[n]} - \sum_{d=1}^D c_d[n] p_d[n] = R_d^{\text{up}}[n] \quad (50)$$

其中:

$$a_d[n] = \log_2(\omega_d^c[n]) - \omega_d^c[n] \beta^2 \sigma^2 - \omega_d^c[n] + 1 \quad (51)$$

$$b_d[n] = 2\omega_d^c[n] \beta \sqrt{h_d[n]} \quad (52)$$

$$c_d[n] = \omega_d^c[n] \beta^2 h_d[n] \quad (53)$$

因此,可以将原非凸问题转化为:

$$\text{P5: } \max_{R_{\min}, \{p_d[n]\}} R_{\min} \quad (54)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^N R_d^{\text{up}}[n] \geq R_{\min}, d \in \mathbf{D} \quad (55)$$

$$0 \leq p_d[n] \leq P_{\max}, d \in \mathbf{D}, n \in \mathbf{N} \quad (56)$$

$$\sum_{n=1}^N \delta_N p_d[n] \leq E, d \in \mathbf{D} \quad (57)$$

此时 P4 中的非凸约束式(43)已经转化为 P5 中的凸约束式(55),可以对 P5 使用凸优化工具 CVX 进行求解。

2.3 算法设计

块坐标下降法通过交替优化轨迹与功率两个子问题,实现二者的联合优化;轨迹优化为功率分配提供更优的信道基础,功率分配阶段基于更新后的信道状态调整发射功率,最大化利用信道增益。当相邻两次迭代值之差小于设定精度 ε 时,可以得到最优飞行轨迹和节点发射功率分配,同时得到最大的最小和速率。算法的复杂度为 $O(CND)$, C 表示满足精度 ε 的迭代次数。算法流程图如图 3 所示。

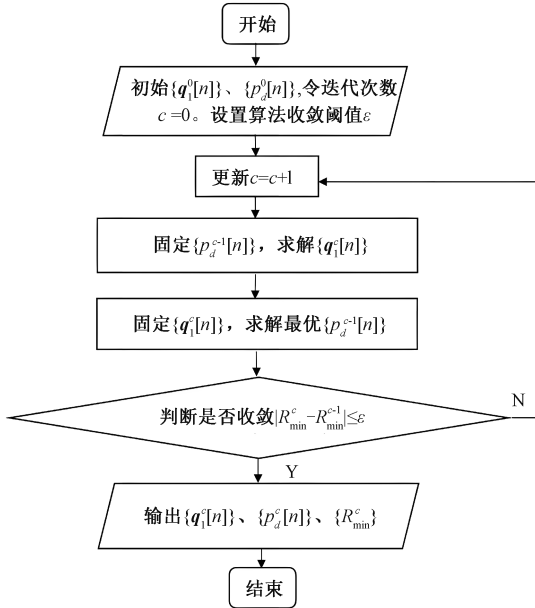


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

3 仿真分析

3.1 PT-WPT 充电结构传输特性分析

在 COMSOL 仿真软件中构建磁耦合线圈模型,对耦合系数随传输距离的变化特性展开研究。仿真中设定的线圈参数如下:线圈外径 240 mm,线圈内径 163 mm,线径 1.65 mm,匝间距 2.2 mm,线圈匝数 $N=10$,频率 $f_0=200$ kHz。计算分析后,所得耦合系数、线圈互感与传输距离关系如图 4 所示。随传输距离从 10 mm 增至 100 mm,耦合系数从约 0.77 降至 0.15,线圈互感从约 15.20 μH 降至 4.75 μH ,均呈持续下降态势。

外界环境变化所导致的无人机轻微晃动往往引起耦合线圈的水平偏移,耦合系数与水平偏移距离关系如图 5 所示。随水平偏移距离从 10 mm 增至 100 mm,耦合系数从约 0.48 降至 0.17,线圈互感从约 15.20 μH 降至 5.29 μH 。

基于 COMSOL 仿真结果,在电路仿真软件中通过改变线圈互感来表征不同传输距离对应的耦合系数 k ,进而分别分析输出功率、传输效率与传输距离和水平偏移距离

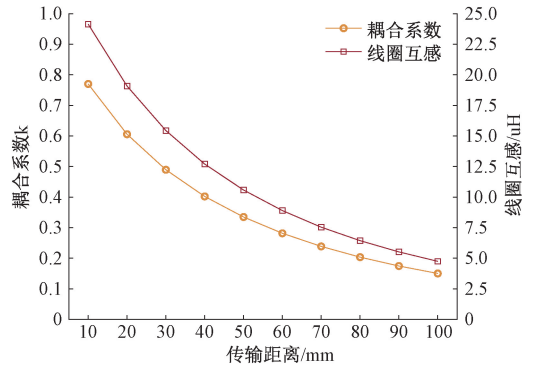


图 4 耦合系数、线圈互感和传输距离的关系

Fig. 4 Relationship among coupling coefficient, coil mutual inductance and transmission distance

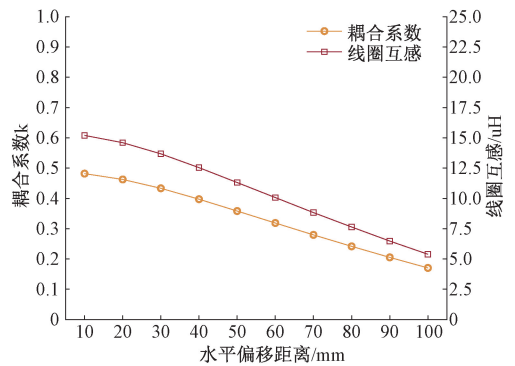


图 5 耦合系数、线圈互感和水平偏移距离的关系

Fig. 5 Relationship among coupling coefficient, coil mutual inductance and horizontal offset distance

的关系。相关参数为直流电压源 $V_{\text{DC}}=13.6$ V,线圈内阻 $r_p=r_s=0.24$ Ω ,补偿电容 $C_p=C_s=19.8$ nF,线圈自感 $L_p=L_s=32$ μH ,直流负载电阻 $R_{\text{LDC}}=6.169$ Ω ,负载电阻 $R_L=5$ Ω 。由式(8)计算可得,临界耦合系数为 0.130 03,据此,当传输距离与水平偏移距离处于 10~100 mm 范围时,系统工作在 PT 对称非破碎态,理论上输出功率和传输效率应保持恒定。图 6 的仿真结果表明,在传输距离变化的过程中,输出功率稳定在约 25 W,传输效率维持在 91%左右,与理论预期一致。

图 7 的仿真结果表明,在水平偏移距离变化的过程中,输出功率也稳定在约 25 W,传输效率维持在 91%左右。这表明,供能 UAV-B 在此范围内,对耦合系数 k 变化不敏感,基本实现恒定功率输出。

3.2 无人机飞行轨迹优化

在一个大小为 500 m $\times$ 500 m 的二维区域内,假设区域内随机分布 5 个节点且位置已知,UAV 从起点出发,飞至终点结束,飞行高度 $H_B=100$ mm。供能无人机 UAV-B 采用动态规划算法,以 $v_B=25$ m/s 的速度匀速遍历所有节点,通过穷举所有可能的路径组合,找到飞行距离最短的最优解。图 8 展示了 UAV-B 的飞行轨迹,UAV-B 从起

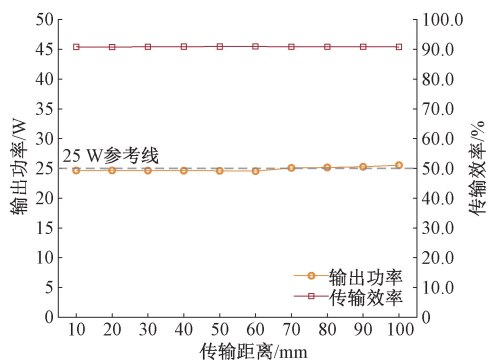


图 6 输出功率、传输效率和传输距离的关系

Fig. 6 Relationship among output power, transmission efficiency and transmission distance

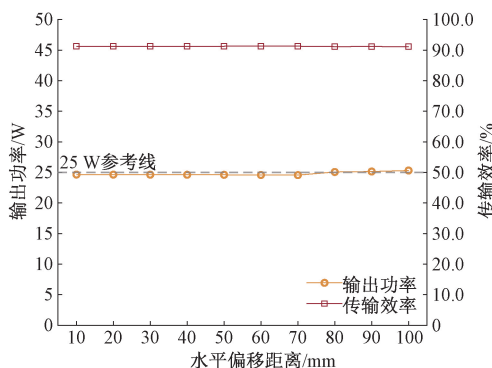


图 7 输出功率、传输效率和水平偏移距离的关系

Fig. 7 Relationship among output power, transmission efficiency and horizontal offset distance

点出发,依次经过各个任务节点,最终抵达终点。有效协调了 UAV-B 与各任务节点之间的关系,减少了不必要的飞行路径迂回,降低了能量损耗,提升了任务执行的时效性与资源利用效率,是信息传输优化的基础。

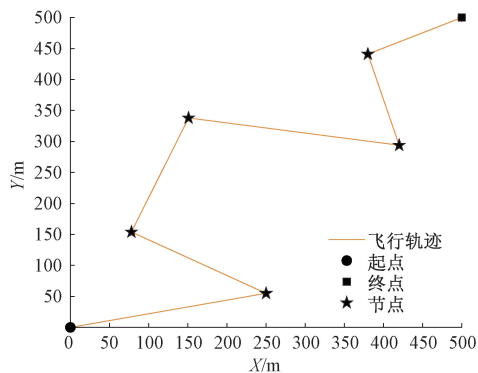


图 8 UAV-B 的飞行轨迹

Fig. 8 Flight trajectory of UAV-B

在确保供能 UAV-B 高效遍历节点的前提下,信息收集 UAV-A 的轨迹直接影响信息传输质量。UAV-A 以恒定高度 $H_A = 40$ m 飞行,系统参数配置如下:接收端处的

加性高斯白噪声 $\sigma^2 = -110$ dBm, 距离 1 m 处的参考信道增益 $\beta_0 = -60$ dB。设定 UAV-A 的最大飞行速度 $v_{\max}^A = 15$ m/s, 节点最大发射功率 $P_{\max} = 10$ W, UAV-B 能量传输功率 $P_L = 25$ W, 时隙总数 $N = 20$ 。

图 9 中对比了任务周期 T 分别为 60 和 80 s 时 UAV-A 的飞行轨迹,并且给出一条从原点到终点的未优化直线轨迹,作为后续对比研究的参照。由图 9 可知,随着周期 T 的增加,UAV-A 的飞行轨迹更靠近节点位置。这一现象与 UAV-A 的最大速度约束直接相关,当周期 T 较小时,受最大速度约束,UAV-A 以高速短程的飞行轨迹完成信息收集的任务,导致飞行轨迹与各节点距离较远;当周期 T 增加时,UAV-A 有更多的时间调整轨迹以靠近节点,提高了与节点之间的信道增益,更好地接收节点信息,从而实现更大的最小和速率。

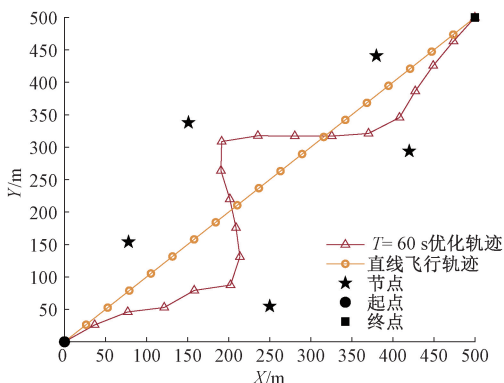
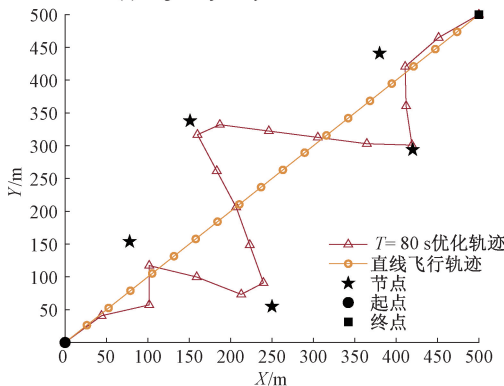
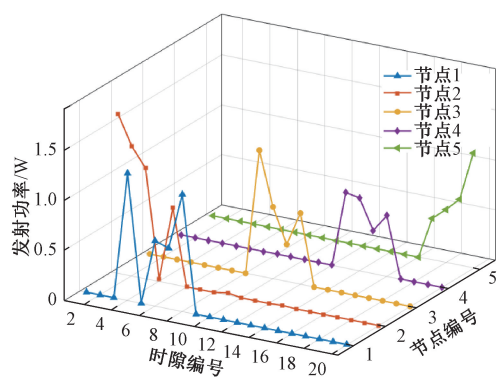
(a) $T=60$ s 时 UAV-A 的飞行轨迹
(a) Flight trajectory of UAV-A at $T=60$ s(b) $T=80$ s 时 UAV-A 的飞行轨迹
(b) Flight trajectory of UAV-A at $T=80$ s

图 9 UAV-A 的飞行轨迹

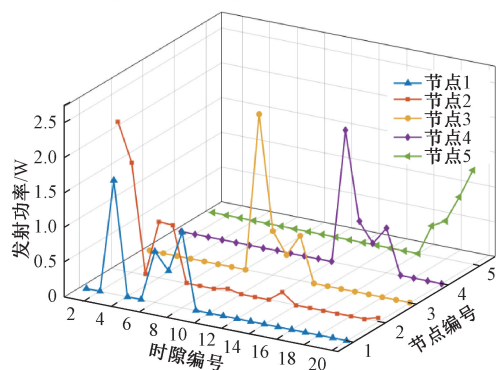
Fig. 9 Flight trajectory of UAV-A

3.3 节点功率分配

图 10 对比了不同周期 T 下各节点在各时隙的发射功率。周期 T 越大,信息收集 UAV-A 有更充裕的时间探寻更优位置,即更靠近节点的位置,促使节点发射功率增大,从而实现更大的最小和速率。此外,各节点在各时隙的不同发射功率反映了不同的信道状态;信息传输完成后,节点发射功率回落至功率约束允许的最小值。



(a) $T=60$ s 时节点发射功率
(a) Transmission power of nodes at $T=60$ s



(b) $T=80$ s 时节点发射功率
(b) Transmission power of nodes at $T=80$ s

图 10 节点发射功率

Fig. 10 Transmission power of nodes

图 11 对比了不同周期 T 下,联合优化方案与其他 3 种最小和速率随迭代次数变化曲线。对比的其他 3 种方案分别为直线飞行仅进行功率分配的方案、仅进行轨迹规划不进行功率分配的方案以及文献[26]中所采用的射频供能方案。由图 11 可知,各方案的系统最小和速率逐渐增加并趋于收敛,证明了所用算法具备快速收敛特性。此外,对于同一方案,随着周期 T 的增大,最小和速率也会增大。这是由于时间越长,UAV-A 的飞行轨迹更贴近节点,从而提升最小和速率。最为关键的是,联合优化方案下的最小和速率显著高于仅轨迹优化或仅功率分配以及采用射频供能的方案。

图 12 对比了系统最小和速率和节点最大发射功率的关系。节点最大发射功率 $P_{\max}$ 依次设置为 1, 3, 5, 10, 15, 20 W, 由图 12 可知,联合优化方案的系统最小和速率随节点最大发射功率的增大呈现先上升后趋于平稳的趋势。这是由于节点最大发射功率存在阈值,未达到阈值时,最大发射功率提升直接促进最小和速率增大;超过阈值后,最小和速率趋于稳定。此外,联合优化方案的最小和速率明显高于仅轨迹优化的方案;在同一联合优化方案中,周期 $T=80$ s 时的最小和速率高于周期 $T=60$ s 时的情况,这是因为时间增加,UAV-A 能够更接近节点,进而提升了系统的

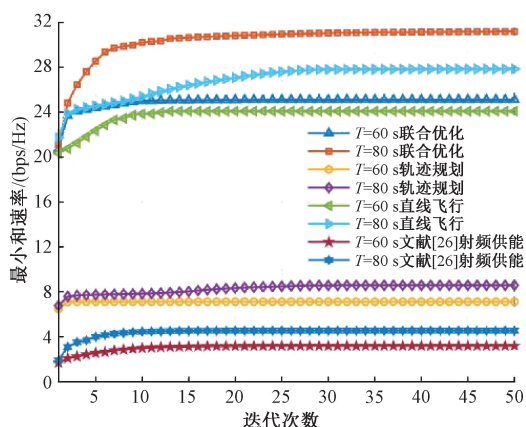


图 11 和速率与迭代次数关系

Fig. 11 Relationship between sum rate and iteration times

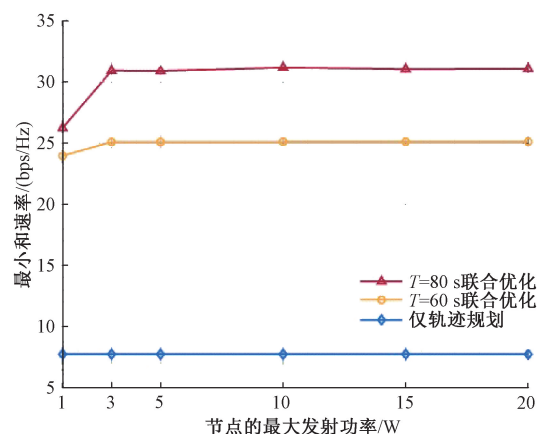


图 12 最小和速率和节点的最大发射功率关系

Fig. 12 Relationship between minimum sum rate and maximum transmission power of nodes

最小和速率。

4 结 论

本文提出了一种基于 PT-WPT 充电结构的双无人机辅助无线供能通信网络,并针对该网络结构研究了其资源分配方法。双无人机分别实现供能与信息收集功能,提升了系统灵活性与整体性能。供能 UAV 通过动态规划算法优化飞行轨迹,实现最短路径下的节点遍历充电;对节点充电时,PT-WPT 充电结构可实现与耦合系数无关的恒定输出功率和恒定效率,提升了抗偏移能力。针对系统最小和速率最大化的问题,联合优化信息收集 UAV 飞行轨迹及节点功率分配,并采用基于块坐标下降法、加权最小均方误差算法和逐次凸逼近技术的算法迭代求解该非凸问题,最终实现最大化最小和速率的优化目标。仿真结果表明:供能 UAV 优化轨迹有效缩短飞行距离;PT-WPT 充电结构能够更高效的为节点提供能量;同时,联合优化算法收敛稳定,证明本文算法的准确性。与直线飞行、固定节点发射功率和射频供能的 3 种方案相比,本文采用的联合优化方案

具有更好的性能。

参考文献

- [1] ZHANG CH Y, LI ZH K, HE CH L, et al. Deep reinforcement learning based trajectory design and resource allocation for UAV-assisted communications [J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(9): 2398-2402.
- [2] QI X H, YUAN M X, ZHANG Q Y, et al. Joint power-trajectory-scheduling optimization in a mobile UAV-enabled network via alternating iteration [J]. China Communications, 2022, 19(1): 136-152.
- [3] 韩东升, 念欣然, 李然. 无人机辅助无线通信位置和波束联合优化方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(20): 88-97.
HAN D SH, NIAN X R, LI R. Joint optimization method of position and beam for UAV aided wireless communication [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20): 88-97.
- [4] 田霖, 苏智杰, 冯婉媚, 等. 面向多无人机携能网络的轨迹与资源规划算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(6): 115-122.
TIAN L, SU ZH J, FENG W M, et al. Trajectory and resource allocation for multi-UAV enabled swipt systems [J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(6): 115-122.
- [5] 张静, 谢亚琴. 能效协同均衡的单无人机动态轨迹优化[J]. 电子测量技术, 2025, 48(22): 1-9.
ZHANG J, XIE Y Q. Energy efficiency cooperative balancing-based dynamic trajectory optimization for a single UAV [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(22): 1-9.
- [6] XIE J, CHANG ZH, GUO X J, et al. Energy efficient resource allocation for wireless powered UAV wireless communication system with short packet [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2023, 7(1): 101-113.
- [7] 吴广通, 张爽, 田文, 等. IRS 辅助无人机轨迹优化在 WSN 中节能数据采集 [J]. 电子测量技术, 2025, 48(11): 131-139.
WU G T, ZHANG SH, TIAN W, et al. IRS assisted UAV trajectory optimization for energy saving data acquisition in WSN [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(11): 131-139.
- [8] 谢礼峰. 无人机辅助无线供能通信网络的资源分配和轨迹优化研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
XIE L F. Resource allocation and trajectory optimization for UAV-enabled wireless powered communication networks[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [9] 谢诗云, 官涵宇, 黄杰, 等. 基于旋转磁场耦合的非对称式无线电能传输系统[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8): 193-206.
XIE SH Y, GUAN H Y, HUANG J, et al. Wireless power transfer system with an asymmetric coupling structure based on rotating magnetic field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 193-206.
- [10] LU W D, SI P Y, LU F W, et al. Resource and trajectory optimization in UAV-powered wireless communication system [J]. Science China (Information Sciences), 2021, 64: 54-67.
- [11] MA X H, NA ZH Y, LIN B, et al. Energy efficiency optimization of UAV-assisted wireless powered systems for dependable data collections in internet of things [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2023, 72(2): 472-482.
- [12] CHOI H H, LEE J R. Joint optimization of altitude and beamwidth for UAV-powered wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(1): 1279-1284.
- [13] LI Q, SHI L Q, ZHANG ZH J, et al. Resource allocation in UAV-enabled wireless-powered MEC networks with hybrid passive and active communications [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(3): 2574-2588.
- [14] PAN H Y, LIU Y H, SUN G, et al. Joint power and 3D trajectory optimization for UAV-enabled wireless powered communication networks with obstacles [J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(4): 2364-2380.
- [15] LYU ZH H, ZHU G X, XU J. Joint maneuver and beamforming design for UAV-enabled integrated sensing and communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(4): 2424-2440.
- [16] ALABSI A, HAWBANI A, WANG X F, et al. Wireless power transfer technologies, applications, and future trends: a review [J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2025, 10(1): 1-17.
- [17] 耿宇宇, 陈华国, 王涛. 无线电能传输系统最优负载优化与最大效率跟踪控制方法 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 23-34.
GENG Y Y, CHEN H G, WANG T. Optimization of optimal load and maximum efficiency tracking control method for wireless power transfer system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 23-34.
- [18] 江兵, 王子博, 刘响, 等. 多负载 MCR-WPT 系统耦合

- 线圈的优化方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(1):112-121.
- JIANG B, WANG Z B, LIU X, et al. Research on optimization methods for coupling coils in multi-load MCR-WPT systems [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(1): 112-121.
- [19] XU ZH H, ZHAO Y SH, HE X M, et al. Resource allocation strategy of UAV-aided WPCN based on magnetic coupling resonance wireless power transfer[C]. 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring), 2022:1-7.
- [20] PARK J, LEE H, EOM S, et al. UAV-aided wireless powered communication networks; trajectory optimization and resource allocation for minimum throughput maximization[J]. IEEE Access, 2019, 7: 134978-134991.
- [21] ASSAWAWORRARIT S, YU X F, FAN SH H. Robust wireless power transfer using a nonlinear parity-time-symmetric circuit [J]. Nature, 2017, 546(7658): 387-390.
- [22] 王思睿, 丘东元, 张波, 等. 宇称-时间对称磁耦合无线电能传输技术研究进展[J]. 电工技术学报, 2025, 40(12):3787-3802.
- WANG S R, QIU D Y, ZHANG B, et al. A review of parity-time symmetric magnetic coupling wireless power transfer technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(12): 3787-3802.
- [23] TANG R, ZHNG R ZH, XU Y J, et al. Energy-efficient optimization algorithm in NOMA-based UAV-assisted data collection systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(1): 158-162.
- [24] 郑萃翀, 肖文勋, 唐哲人. 基于宇称时间对称原理的无人机无线充电技术[J]. 中山大学学报(自然科学版中英文), 2022, 61(6):151-157.
- ZHENG C CH, XIAO W X, TANG ZH R. Wireless charging technology for UAV based on parity-time symmetry [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2022, 61(6): 151-157.
- [25] SHEN K M, YU W. Fractional programming for communication systems—Part I: Power control and beamforming [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(10): 2616-2630.
- [26] 韩东升, 梁燊. 无人机辅助传感器网络中吞吐量与节点能量优化方法[J]. 电讯技术, 2024, 64(7):1005-1014.
- HAN D SH, LIANG Y. A throughput and nodes energy optimization method in UAV-assisted sensor network[J]. Telecommunication Engineering, 2024, 64(7):1005-1014.

作者简介

李然, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为无线电能传输、无线通信、电磁计算。

E-mail:ncepulr@sina.com

王玫苏(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信。

E-mail:757354062@qq.com