

# 智能反射面辅助的无人机无线携能通信网络吞吐量最大化算法研究

刘志新\* 赵松吟 杨毅 袁亚洲

(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

**摘要:** 为了解决城市场景中无人机(UAV)与地面终端设备(GUs)间易受到障碍物阻挡的问题, 该文提出一种基于智能反射面(IRS)辅助的UAV供能通信网络吞吐量最大化算法。首先, 在满足能量因果、IRS相移、UAV移动性等约束条件下, 建立了一个联合IRS相移设计、GU无线资源分配、UAV飞行轨迹设计的多变量耦合优化模型。其次, 通过块坐标下降法(BCD)将原非凸问题转换为3个易于处理的子问题, 并通过三角不等式、引入松弛变量、连续凸近似(SCA)等方法, 对子问题进行转化求解。仿真结果表明, 该文所提算法具有较好的收敛性, 同时可有效提高系统总吞吐量。

**关键词:** 无人机通信网络; 智能反射面; 无线资源分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)07-2325-07

DOI: [10.11999/JEIT220195](https://doi.org/10.11999/JEIT220195)

## Throughput Maximization Algorithm for Intelligent Reflecting Surface-aided Unmanned Aerial Vehicle Communication Networks with Wireless Energy Transfer

LIU Zhixin ZHAO Songhan YANG Yi YUAN Yazhou

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In order to mitigate the adverse effect of blockages between the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Ground Users (GUs), a throughput maximization algorithm for an Intelligent Reflecting Surface (IRS)-aided UAV communication network is proposed. First, considering the constraints of the energy causality, the IRS phase-shift, the UAV mobility, etc, a multi-variable coupling optimization problem is proposed with jointly optimizing the phase-shift of the IRS, the resource allocation of GUs, and the UAV trajectory. Second, the original non-convex problem is decomposed into three simpler sub-problems via the Block Coordinate Descent (BCD), which are tackled by the triangle inequality, introducing the slack variables and Successive Convex Approximation (SCA). Numerical results show that the proposed algorithm has a desirable convergence, as well as improves effectively the system sum-throughput.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV) communications; Intelligent Reflecting Surface (IRS); Wireless resource allocation

### 1 引言

未来智慧城市的发展和大规模低功耗物联网技术的应用, 将导致无线终端节点数量的激增。然而, 复杂的通信环境以及终端用户能量受限等问题, 将极大制约其发展。为此, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)由于其高机动性和灵活性, 在复杂的通信网络中得到了广泛的应用。目前针对

UAV通信网络的研究已取得了很多有价值的结果, 文献[1]中, UAV同时作为移动的数据收集者与能量供应者, 通过联合优化UAV的时间分配和轨迹设计, 最大化多UAV无线供电网络中的上行链路传输速率。文献[2]研究了UAV最小能耗问题, 并通过优化UAV悬停位置, 最终实现系统的整体节能优化。以上工作证实了UAV路径的合理设计是系统提升系统性能关键因素之一。然而, 在复杂的通信环境中, 如城市建筑密集区, UAV与地面用户(Ground Users, GUs)之间的直接链路可能会受到障碍物的遮挡, 从而严重影响通信质量。

智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)技术由于其低功耗、高效、可重构传输环境

收稿日期: 2022-02-28; 改回日期: 2022-04-05; 网络出版: 2022-04-15

\*通信作者: 刘志新 lzxauto@ysu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61873223)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61873223)

等特点, 已受到学术界和工业界的广泛关注<sup>[3]</sup>. IRS由一系列离散反射元件组成, 每个反射元件都能独立地反射入射信号. 在微处理器的控制下, 所有反射元件可以调控其入射信号的振幅和相移, 从而达到理想的多径效果<sup>[4]</sup>. 为解决复杂环境中UAV与GUs间通信链路受阻问题, 将IRS融入现有的UAV系统中将成为有效的解决方案. 文献<sup>[5]</sup>针对IRS辅助下的UAV通信网络, 联合优化IRS相移和UAV飞行轨迹, 研究了系统最大化安全速率问题. 文献<sup>[6]</sup>研究了IRS辅助下的边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)场景, 其中UAV作为空中的MEC服务器. 仿真结果表明, IRS的辅助可以有效降低系统总能耗.

然而, 上述工作并没有考虑IRS以及GUs的能源受限问题. 事实上, 虽然IRS以其低功耗的特性为人熟知, 当反射单元数量的提升, 便不再可以忽略IRS的能耗<sup>[7]</sup>. 然而, 使用传统布线或电池供应方案为IRS供电, 不仅会增加维护成本, 而且不便于IRS的灵活部署, 难以应用到通信环境较为恶劣的场景. 因此无线能量收集(Wireless Energy Harvesting, WEH)技术可成为上述问题的解决方案. 综上所述, 本文基于城市环境中, 提出一种新型的IRS辅助的UAV通信系统, 通过适当部署IRS, 以解决UAV与GUs间通信链路受阻问题. 同时, IRS与GUs可以利用WEH从UAV的射频信号中收集能量. 本文的主要贡献点如下: (1) 本文建立了IRS辅助下UAV无线供能通信模型, 通过联合优化IRS的相移、GUs的发射功率和时间分配以及UAV路径规划, 提升系统总吞吐量. (2) 本文提出一种基于块坐标下降法(Block Coordinate Descent, BCD)的资源分配算法来求解上述耦合且非凸的问题. 其中, 通过引入松弛变量、1阶泰勒表达式和连续凸近似(Successive Convex Approximation, SCA)的方法将非凸的子问题转化为凸问题进而求解. (3) 数值仿真证明了本文所提算法具有较好的收敛性, 并且与对比算法相比, 可获得更高的总吞吐量.

## 2 系统模型及问题描述

如图1所示, 本文在城市复杂通信场景下, 构建了IRS辅助的UAV无线供能通信模型. 由于在城市环境中, UAV与GUs间链路会受到障碍物的阻挡而影响通信性能, 本文通过合理部署IRS从而改变信号的传输方向来改善遮挡问题. 系统中包含 $M$ 个单天线GUs, 1个单天线UAV和1个含 $K$ 个反射元件的IRS. GUs和IRS从UAV发射的射频信号中收集能量以维持运行. 假设UAV有固定飞行高

度 $H_U$ 以及飞行周期 $T$ , 为了方便分析,  $T$ 被等分为 $N$ 个时隙, 每个时隙长度为 $\delta$ . 定义UAV在第 $n$ 时刻的水平坐标为 $\mathbf{q}[n] = [x_n[n], y_n[n]]^T, n \in \mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ . 将第 $m$ 个GU表示为GU $_m$ , 其水平坐标表示为 $\mathbf{w}_m = [x_m, y_m]^T, \forall m \in \mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ , IRS的水平坐标以及高度表示为 $\mathbf{w}_r = [x_r, y_r]^T$ 和 $H_R$ . 考虑到受限的飞行能力, UAV应满足移动约束为

$$\|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\| \leq V_{\max}\delta, 1 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

$$\mathbf{q}[1] = \mathbf{q}_I, \mathbf{q}[N] = \mathbf{q}_F \quad (2)$$

其中,  $V_{\max}$ 表示UAV水平最大飞行速度,  $\mathbf{q}_I$ 和 $\mathbf{q}_F$ 分别表示UAV初始位置与最终位置. 为了便于分析, 本文假设IRS使用均匀线性阵列(Uniform Linear Array, ULA). 每个反射元件能够调整入射信号的相位后进行反射. 在第 $n$ 时隙, IRS的相移矩阵可以表示为 $\Theta_m[n] = \text{diag}\{e^{-j\theta_{m,1}[n]}, e^{-j\theta_{m,2}[n]}, \dots, e^{-j\theta_{m,K}[n]}\}$ , 其中 $\theta_{m,k}[n] \in [0, 2\pi), k \in \mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 是第 $k$ 个反射元件的调制相移.

出于实际考虑, 不同节点之间的信道应根据其相应的通信环境进行建模. 由于UAV和IRS(U-R)之间的信号传播时一般不受障碍物遮挡, 因此本文中U-R链路采用视距(Line-of-Sight, LoS)信道模型<sup>[8]</sup>. 同时, 考虑到GUs部署于地面, 周围存在局部散射, IRS和GUs之间的(R-G)链路采用了莱斯信道模型<sup>[9]</sup>. 针对UAV-GU(U-G)链路, 本文考虑两种情况, 首先考虑通信环境为复杂的城市场景, U-G链路受遮挡严重, 假设UAV和GU之间不存在LoS链路, 因此, U-G链路采用瑞利信道模型<sup>[10]</sup>. 此时, 第 $n$ 时隙处U-R, R-G和U-G链路之间的信道增益 $\mathbf{h}_{UR}[n] \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ ,  $\mathbf{h}_{RG,m}[n] \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 和 $h_{UG,m}^{\text{Ray}}[n]$ 可分别表示为

$$\mathbf{h}_{UR}[n] = \sqrt{\beta_0 D_{UR}^{-2}[n]} \left[ 1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \Delta\varphi_{UR}[n]}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (K-1) \Delta\varphi_{UR}[n]} \right]^T \quad (3)$$

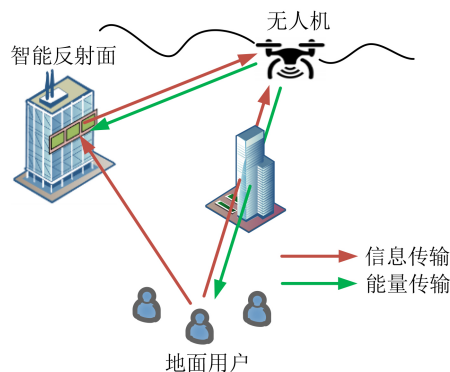


图1 IRS辅助的UAV供能通信网络

$$\mathbf{h}_{\text{RG},m}[n] = \sqrt{\beta_0 D_{\text{RG},m}^{-\alpha}} \left( \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} \mathbf{h}_{\text{RG},m}^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{\kappa+1}} \mathbf{h}_{\text{RG},m}^{\text{NLoS}}[n] \right) \quad (4)$$

$$h_{\text{UG},m}^{\text{Ray}}[n] = \sqrt{\beta_0 D_{\text{UG},m}^{-\beta}} \tilde{h}_m[n] \quad (5)$$

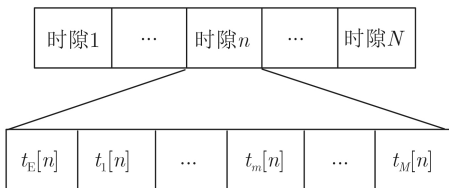
同时, 考虑非城市通信场景下U-G链路信道状况, 即UAV与GUs间不受障碍物影响, 此时, U-G链路将建模为LoS信道模型<sup>[11]</sup>, 其信道增益 $h_{\text{UG},m}^{\text{LoS}}[n]$ 可表示为

$$h_{\text{UG},m}^{\text{LoS}}[n] = \sqrt{\beta_0 D_{\text{UG},m}^{-2}} \quad (6)$$

其中,  $\beta_0$ 表示单位距离下信道功率增益。U-R, R-G和U-G链路在 $n$ 时隙时的距离分别为 $D_{\text{UR}}[n] = \sqrt{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_r\|^2 + (H_U - H_R)^2}$ ,  $D_{\text{RG},m} = \sqrt{\|\mathbf{w}_r - \mathbf{w}_m\|^2 + H_R^2}$ 和 $D_{\text{UG},m} = \sqrt{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_m\|^2 + H_U^2}$ ,  $\forall m, n$ 。2,  $\alpha, \beta$ 分别是U-R, R-G和U-G链路上的路损指数。 $\lambda$ 为载波波长,  $\Delta$ 为天线间距离,  $\varphi_{\text{UR}}[n] = \frac{x_u[n] - x_r}{D_{\text{UR}}[n]}$ 为U-R链路信号离开角的余弦值,  $\varphi_{\text{RG},m} = \frac{x_r - x_m}{D_{\text{RG},m}}$ 为R-G链路信号到达角的余弦值,  $\kappa$ 为莱斯指数,  $\mathbf{h}_{\text{RG},m}^{\text{LoS}} = \left[ 1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\varphi_{\text{RG},m}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(K-1)\Delta\varphi_{\text{RG},m}} \right]^T$ 为R-G链路中的LoS部分,

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\Theta, \mathbf{P}, t_E, t_m, \mathbf{q}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M R_m[n] \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \sum_{n=1}^N P_m[n] t_m[n] \leq \sum_{n=1}^N E_{\text{G},m}[n], \forall m, \quad \text{C2: } K\mu \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M t_m[n] \leq \sum_{n=1}^N E_{\text{R}}[n] \\ & \text{C3: } t_E[n] + \sum_{m=1}^M t_m[n] \leq \delta, \forall n, \quad \text{C4: } 0 \leq \theta_{m,k}[n] < 2\pi, \forall m, n, k \\ & \text{C5: } t_m[n], t_E[n] \geq 0, \forall m, n, \quad \text{C6: } P_m[n] \geq 0, \forall m, n \\ & \text{C7: } \|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\| \leq V_{\text{max}}\delta, \forall n, \quad \text{C8: } q[1] = q_{\text{I}}, q[N] = q_{\text{F}}, \forall m, n \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中,  $\Theta = \{\Theta_m[n], \forall m, n\}$ ,  $\mathbf{P} = \{P_m[n], \forall m, n\}$ ,  $t_E = \{t_E[n], \forall n\}$ ,  $t_m = \{t_m[n], \forall m, n\}$ ,  $\mathbf{q} = \{\mathbf{q}[n], \forall n\}$ 。约束C1和C2分为表示GU<sub>m</sub>和IRS的能量收集约束, C3表示时间约束, C4表示IRS相移约束,



$t_E[n]$ 能量收集阶段

$t_m[n]$ 信息传输阶段

图2 时隙分配

$\mathbf{h}_{\text{RG},m}^{\text{NLoS}}[n]$ 为非视距(Non Line-of-Sight, NLoS)部分, 其服从均值为0方差为1的循环对称复高斯分布。 $\tilde{h}_m[n]$ 表示为随机散射指数, 其同样服从均值为0方差为1的循环对称复高斯分布。

如图2所示, 所提出的系统采用先收集能量后传输信息(Harvest-Then-Transmit, HTT)策略, 即在第 $n$ 时隙中, IRS和GUs首先通过 $t_E[n]$ 时段从UAV的射频信号中收集能量。 $E_{\text{G},m}[n] = \eta P_0 t_E[n] |h_{\text{UG},m}[n]|^2$ 和 $E_{\text{R}}[n] = \eta P_0 t_E[n] \|\mathbf{h}_{\text{UR}}[n]\|^2$ 分别表示GU<sub>m</sub>与IRS收集的能量, 其中 $0 \leq \eta \leq 1$ 表示能量转化效率,  $P_0$ 表示UAV的固定发射功率。随后GU<sub>m</sub>利用收集的能量在IRS辅助下以时间 $t_m[n]$ 上行传输信息。为了便于分析, 本文采用单位带宽设置, 因此在第 $n$ 时隙下GU<sub>m</sub>的可实现速率表示为

$$R_m[n] = t_m[n] \log_2 \left( 1 + \frac{P_m[n] |\mathbf{h}_{\text{UR}}^H[n] \Theta_m[n] \mathbf{h}_{\text{RG},m}[n] + h_{\text{UG},m}[n]|^2}{\sigma^2} \right) \quad (7)$$

其中,  $P_m[n]$ 表示GU<sub>m</sub>在第 $n$ 时隙的发射功率,  $\sigma^2$ 为背景噪声功率。

本文目标为通过联合优化IRS相移矩阵, GU<sub>m</sub>的发射功率以及传输时间和UAV飞行轨迹, 最大化系统总吞吐量。综上所述, 最大化系统总吞吐量优化问题可描述为

C7和C8表示UAV移动约束。由于目标函数与约束中多处存在变量耦合, 因此优化问题式(8)难以直接求最优解。

### 3 优化问题转换及求解

由于优化问题式(8)存在变量之间的耦合与非凸性, 难以用传统凸优化方式直接求解。为解决这一问题, 本文利用BCD资源优化方法, 将原问题解耦为3个易于求解的子问题, 通过对子问题之间进行交替优化, 最终求解原问题。

#### 3.1 IRS相移矩阵优化

首先固定变量 $\mathbf{P}$ ,  $t_E$ ,  $t_m$ 和 $\mathbf{q}$ , 问题式(8)转变为关于变量 $\Theta$ 的子问题, 即

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\Theta_m[n]} |\mathbf{h}_{\text{UR}}^{\text{H}}[n] \Theta_m[n] \mathbf{h}_{\text{RG},m} + h_{\text{UG},m}[n]|^2 \\ & \text{s.t.} \quad \text{C4} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据三角不等式, 问题式(9)的目标函数满足条件

$$\left. \begin{aligned} & |\mathbf{h}_{\text{UR}}^{\text{H}}[n] \Theta_m[n] \mathbf{h}_{\text{RG},m} + h_{\text{UG},m}[n]| \\ & \stackrel{(a)}{\leq} |\mathbf{h}_{\text{UR}}^{\text{H}}[n] \Theta_m[n] \mathbf{h}_{\text{RG},m}| + |h_{\text{UG},m}[n]| \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由不等式(10)可以看出, 当(a)取等号时, 子问题式(9)可以取到最大值。与文献[12]中的方法类似, 通过控制IRS相移矩阵, 将其反射链路和直射链路相位进行对齐, 从而得到最优反射相移

$$\left. \begin{aligned} \theta_{m,k}^*[n] &= \theta_{0,m}[n] - \arg(h_{\text{UR},k}^{\text{H}}[n]) - \arg(h_{\text{RG},m,k}[n]), \\ & \forall k, m, n, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中,  $\theta_{0,m}[n] = \arg(h_{\text{UG},m}[n])$ 为U-G链路的相位,  $h_{\text{UR},k}^{\text{H}}[n]$ 为U-R链路信道向量 $\mathbf{h}_{\text{UR}}^{\text{H}}[n]$ 的第 $k$ 个元素,  $h_{\text{RG},m,k}$ 为R-G链路信道向量 $\mathbf{h}_{\text{RG},m}$ 第 $k$ 个元素。

### 3.2 功率和传输时间优化

求解IRS变量 $\Theta$ 后, 问题式(8)关于变量 $\mathbf{P}, t_{\text{E}}$ 和 $t_m$ 的子问题可构建为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{P}, t_{\text{E}}, t_m} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M t_m[n] \log_2 \left( 1 + \frac{P_m[n] \xi_m[n]}{\sigma^2} \right) \\ & \text{s.t.} \quad \text{C1, C2, C3, C5, C6} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中,  $\xi_m[n] = |\mathbf{h}_{\text{UR}}^{\text{H}}[n] \Theta_m[n] \mathbf{h}_{\text{RG},m}| + |h_{\text{UG},m}[n]|^2$ 。此时C2中存在两变量的乘积 $P_m[n] t_m[n]$ , 因此, 子问题式(12)仍然是一个非凸的问题。为解决这一问题, 引入松弛变量 $\mathbf{E} = \{E_m[n] = P_m[n] t_m[n], \forall m, n\}$ , 子问题式(12)可转化为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{E}, t_{\text{E}}, t_m} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M t_m[n] \log_2 \left( 1 + \frac{E_m[n] \xi_m[n]}{t_m[n] \sigma^2} \right) \\ & \text{s.t.} \quad \widetilde{\text{C1}}: \sum_{n=1}^N E_m[n] \leq \sum_{n=1}^N E_{\text{G},m}[n], \quad \forall m \\ & \quad \quad \widetilde{\text{C6}}: E_m[n] \geq 0, \quad \forall m, n \\ & \quad \quad \text{C2, C3, C5} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由于透视变换不改变原函数的凹凸性[13], 因此问题式(13)的目标函数与 $f(E_m[n]) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log_2(1 + E_m[n] \xi_m[n] / \sigma^2)$ 具有相同的凹凸性。由于 $f(E_m[n])$ 是关于 $E_m[n]$ 的凹函数, 因此, 问题式(13)的目标函数对于 $\mathbf{E}$ 和 $t_m$ 是联合凹函数。同时, 问题式(13)的约束均为仿射约束, 此时子问题式(13)是一个凸优化问题, 可以直接利用CVX工具箱求解。

### 3.3 UAV飞行轨迹优化

在优化上述变量后, 原问题式(8)关于UAV飞

行变量 $\mathbf{q}$ 仍然是非凸的。本节以U-G链路为瑞利信道模型进行求解, LoS信道模型可用相同方法进行分析。为了便于求解, 这里引入两个松弛变量 $\mathbf{x} = \{x_m[n], \forall m, n\}$ , 其中 $x_m[n] = D_{\text{UG},m}[n]$ 和 $\mathbf{y} = \{y[n], \forall n\}$ , 其中 $y[n] = D_{\text{UR}}[n]$ , 此时, 原问题式(8)关于变量 $\mathbf{q}, \mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 可转化为子问题

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{q}, \mathbf{x}, \mathbf{y}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M t_m[n] \\ & \quad \cdot \log_2 \left( 1 + \gamma_m[n] \left| \frac{U_m[n]}{x_m^{(\beta/2)}[n]} + \frac{I_m[n]}{y[n]} \right|^2 \right) \\ & \text{s.t.} \quad \text{C9: } D_{\text{UG},m}[n] \leq x_m[n], \quad \forall m, n \\ & \quad \quad \text{C10: } D_{\text{UR}}[n] \leq y[n], \quad \forall n \\ & \quad \quad \text{C1, C2, C7, C8} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中,  $\gamma_m[n] = P_m[n] / \sigma^2$ ,  $U_m[n] = \sqrt{\beta_0} |\tilde{h}_m[n]|$ ,  $I_m[n] = \sqrt{\beta_0} \sum_{m=1}^K |h_{\text{RG},m,k}[n]|$ 。已知, 子问题式(14)在最优条件下, 约束C9和C10将满足等式约束, 否则可通过降低 $x_m[n]$ 和 $y[n]$ 来进一步提升子问题式(14)的目标函数值。因此, 引入松弛变量后, 原问题的最优解不变。通过以上转化后, 可知子问题式(14)的目标函数是凸函数, 且约束C1, C2, C9和C10不是凸集, 所以子问题式(14)仍然难以被直接求解。因此, 下文将通过对于子问题式(14)进行适当转化, 进而得到其易于求解的近似问题。已知凸函数的1阶泰勒展开可得到其全局线性下界, 所以在展开点 $x_{0,m}[n], \forall m, n$ 和 $y_0[n], \forall n$ 上, 对于子问题式(14)的目标函数做1阶泰勒展开可得

$$\left. \begin{aligned} & \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_m[n] U_m^2[n]}{x_m^{\beta}[n]} \right. \\ & \quad \left. + \frac{2\gamma_m[n] U_m[n] I_m[n]}{x_m^{(\beta/2)}[n] y[n]} + \frac{\gamma_m[n] I_m^2[n]}{y^2[n]} \right) \\ & \geq \log_2 M_{0,m}[n] + \frac{M_{1,m}[n]}{M_{0,m}[n] \ln 2} (x_m[n] - x_{0,m}[n]) \\ & \quad + \frac{M_{2,m}[n]}{M_{0,m}[n] \ln 2} (y[n] - y_0[n]) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中,  $M_{0,m}[n] = 1 + \frac{\gamma_m[n] U_m^2[n]}{x_{0,m}^{\beta}[n]} + \frac{2\gamma_m[n] U_m[n] I_m[n]}{x_{0,m}^{(\beta/2)}[n] y_0[n]} + \frac{\gamma_m[n] I_m^2[n]}{y_0^2[n]}$ ,  $M_{1,m}[n] = - \left( \frac{\gamma_m[n] \beta U_m^2[n]}{x_{0,m}^{(\beta+1)}[n]} + \frac{\gamma_m[n] \beta U_m[n] I_m[n]}{x_{0,m}^{(\beta/2+1)}[n] y_0[n]} \right)$ ,  $M_{2,m}[n] = - \left( \frac{2\gamma_m[n] I_m^2[n]}{y_0^3[n]} + \frac{2\gamma_m[n] U_m[n] I_m[n]}{y_0^2[n] x_{0,m}^{(\beta/2)}[n]} \right)$ 。

同样, 再次对约束C1, C2, C9和C10的右端进行1阶泰勒展开, 可得

$$E_{G,m}[n] \geq \eta P_0 t_E[n] |\tilde{h}_m[n]|^2 \left( \frac{\beta_0}{x_{0,m}^\beta[n]} - \frac{\beta_0 \beta}{x_{0,m}^{(\beta+1)}[n]} (x_m[n] - x_{0,m}[n]) \right) \triangleq E_{G,m}^{\text{lb}}[n] \quad (16)$$

$$E_R[n] \geq K \eta P_0 t_E[n] \left( \frac{\beta_0}{y_0^2[n]} - \frac{2\beta_0}{y_0^3[n]} (y[n] - y_0[n]) \right) \triangleq E_R^{\text{lb}}[n] \quad (17)$$

$$-x_m^2[n] \leq x_{0,m}^2[n] - 2x_{0,m}[n]x_m[n] \quad (18)$$

$$-y^2[n] \leq y_0^2[n] - 2y_0[n]y[n] \quad (19)$$

将上述变换代入子问题式(14)中, 并简化后可得

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{q}, \mathbf{x}, \mathbf{y}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{t_m[n] M_{1,m}[n]}{M_{0,m}[n] \ln 2} x_m[n] \\ & \quad + \frac{t_m[n] M_{2,m}[n]}{M_{0,m}[n] \ln 2} y[n] \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{n=1}^N P_m[n] t_m[n] \leq \sum_{n=1}^N E_{G,m}^{\text{lb}}[n], \quad \forall m \\ & K \mu \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M t_m[n] \leq \sum_{n=1}^N E_R^{\text{lb}}[n] \\ & D_{UG,m}^2[n] + x_{0,m}^2[n] - 2x_{0,m}[n]x_m[n] \leq 0 \\ & \quad \forall m, n \\ & D_{UR}^2[n] + y_0^2[n] - 2y_0[n]y[n] \leq 0, \quad \forall n \\ & \text{C7, C8} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

此时由于具有线性的目标函数与仿射约束, 子问题式(20)是一个凸优化问题, 可利用标准凸优化求解工具CVX求解。为了保证问题式(20)对子问题式(14)具有较好的近似效果, 此处采用SCA在每次迭代中多次逼近原问题。通过对上述3个子问题进行交替优化直至收敛, 可获得问题式(8)较为精确的次优解。

### 3.4 算法分析

综上所述, 基于BCD的资源优化算法如表1所示。

所提算法的总计算复杂度主要取决于步骤(3)—步骤(5)。其中步骤(3)的计算复杂度为 $\mathcal{O}\{KMN\}$ ; 步骤(4)与步骤(5)利用CVX中的内点法进行求解, 因此其计算复杂度分别为 $\mathcal{O}\{(MN)^{3.5}\}$ 和 $\mathcal{O}\{L_1(MN)^{3.5}\}$ <sup>[4]</sup>, 其中 $L_1$ 是步骤(5)中SCA过程的逼近次数。综上, 所提算法的总计算复杂度为 $\mathcal{O}\{(KMN + (L_1 + 1)(MN)^{3.5}) \ln(1/\varepsilon)\}$ , 其中 $\varepsilon$ 为收敛精度。接下来, 对所提算法的收敛性进行证明。此处将问题式(8)的目标函数值记为 $\psi$ , 问题式(20)的目标函数记为 $\psi_{\text{lb}}$ , 在第 $l$ 次迭代中可得到如式(21)的关系

$$\begin{aligned} & \psi(\Theta^{(l-1)}, \mathbf{P}^{(l-1)}, \mathbf{t}_E^{(l-1)}, \mathbf{t}_m^{(l-1)}, \mathbf{q}^{(l-1)}) \\ & \stackrel{(b)}{\leq} \psi(\Theta^{(l)}, \mathbf{P}^{(l-1)}, \mathbf{t}_E^{(l-1)}, \mathbf{t}_m^{(l-1)}, \mathbf{q}^{(l-1)}) \\ & \stackrel{(c)}{\leq} \psi(\Theta^{(l)}, \mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{t}_E^{(l)}, \mathbf{t}_m^{(l)}, \mathbf{q}^{(l-1)}) \\ & \stackrel{(d)}{=} \psi_{\text{lb}}(\Theta^{(l)}, \mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{t}_E^{(l)}, \mathbf{t}_m^{(l)}, \mathbf{q}^{(l-1)}) \\ & \stackrel{(e)}{\leq} \psi_{\text{lb}}(\Theta^{(l)}, \mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{t}_E^{(l)}, \mathbf{t}_m^{(l)}, \mathbf{q}^{(l)}) \\ & \stackrel{(f)}{\leq} \psi(\Theta^{(l)}, \mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{t}_E^{(l)}, \mathbf{t}_m^{(l)}, \mathbf{q}^{(l)}) \end{aligned} \quad (21)$$

其中(b)和(c)的成立, 是由于 $\Theta^{(l)}$ ,  $\mathbf{P}^{(l)}$ ,  $\mathbf{t}_E^{(l)}$ 和 $\mathbf{t}_m^{(l)}$ 的更新是对子问题式(9)和式(12)的最优求解, (d)的成立是因为通过1阶泰勒展开后, 子问题式(20)和式(14)在1阶泰勒展开点可得到相同目标函数值, (e)的成立是由于 $\mathbf{q}^{(l)}$ 的更新是对子问题式(20)的最优求解, (f)的成立是由于子问题式(20)的目标函数是子问题式(14)的下界。综上可知, 在每次迭代中,  $\psi$ 是单调递增的, 且 $\psi$ 具有有限的上界, 因此可证明所提出的BCD资源分配算法的收敛性<sup>[15]</sup>。

## 4 数值仿真及分析

本节为验证所提算法的可行性与优越性, 选取单一优化UAV轨迹(随机IRS相移)和单一优化IRS相移(UAV选用初始轨迹)作为对比。在系统设置上, 选取 $M = 3$ ,  $\mathbf{q}_I = [0, 0]^T \text{m}$ ,  $\mathbf{q}_F = [500, 500]^T \text{m}$ ,  $\mathbf{w}_r = [0, 350]^T \text{m}$ ,  $\mathbf{w}_1 = [100, 50]^T \text{m}$ ,  $\mathbf{w}_2 = [400, 300]^T \text{m}$ ,  $\mathbf{w}_3 = [300, 450]^T \text{m}$ ,  $H_U = 30 \text{ m}$ ,  $H_R = 15 \text{ m}$ ,  $\delta = 1 \text{ s}$ ,

表1 基于BCD的资源分配算法

初始化系统参数: $\Theta^{(0)}$ , $\mathbf{P}^{(0)}$ , $\mathbf{t}_E^{(0)}$ , $\mathbf{t}_m^{(0)}$ , $\mathbf{q}^{(0)}$ , $\psi^{(0)}$ ; 设置最大迭代次数 $L_{\text{max}}$ ; 设置收敛精度 $\varepsilon > 0$ ; 迭代次数 $l = 0$ ;
(1) Repeat
(2) 设置迭代次数 $l = l + 1$ ;
(3) 根据给定的 $\mathbf{P}^{(l-1)}$ , $\mathbf{t}_E^{(l-1)}$ , $\mathbf{t}_m^{(l-1)}$ , $\mathbf{q}^{(l-1)}$ , 通过式(11)更新 $\Theta^{(l)}$ ;
(4) 根据给定的 $\Theta^{(l)}$ 和 $\mathbf{q}^{(l-1)}$ , 通过求解问题式(13)得到 $\mathbf{P}^{(l)}$ , $\mathbf{t}_E^{(l)}$ 和 $\mathbf{t}_m^{(l)}$ ;
(5) 根据给定的 $\mathbf{P}^{(l)}$ , $\mathbf{t}_E^{(l)}$ , $\mathbf{t}_m^{(l)}$ 和 $\Theta^{(l)}$ , 通过求解问题式(20)得到 $\mathbf{q}^{(l)}$ ;
(6) Until $ \psi^{(l)} - \psi^{(l-1)}  \leq \varepsilon$ 或者 $l \geq L_{\text{max}}$ ;
(7) 结束并输出结果。

$V_{\max} = 50 \text{ m/s}$ ,  $P_0 = 40 \text{ dBm}$ ,  $\beta_0 = -50 \text{ dB}$ ,  $\lambda = 0.1 \text{ m}$ ,  $\Delta = \lambda/2$ ,  $\kappa = 2$ ,  $\alpha = 2.8$ ,  $\beta = 3.5$ ,  $\eta = 0.8$ , 噪声功率谱密度为  $-174 \text{ dBm/Hz}$ , 其余变量将在下文仿真中给出。

图3展示本文所提算法优化后的UAV轨迹。当U-G链路为瑞利衰落模型时, 飞行时间充足条件下 ( $N = 50$ ), UAV倾向以直线形式抵达IRS和GUs, 并在每个IRS和GU上方悬停一定时间。这是因为UAV靠近传输节点以减少路径损耗, 同时有利于能量传输和信息收集。在飞行时间不足时 ( $N = 20$ ), UAV仍然可以发挥其移动性尽量靠近IRS以提高传输效率。当U-G链路为LoS信道模型时, UAV不再倾向靠近IRS。这是因为在U-G链路具有较好的信道环境下, UAV从U-G链路可获得比IRS辅助的反射链路更多的性能收益。因此, IRS辅助的UAV系统更加适用于U-G链路受阻场景下。

图4给出了不同情况下系统总吞吐量与迭代次数的关系。随着迭代次数增加, 系统总吞吐量升高并最终收敛。由图可知, 所有算法可以在4次迭代后收敛到唯一值, 说明所提基于BCD的资源分配算法具有良好的收敛性。

图5给出了使用SCA对原函数的逼近结果。由于1阶泰勒展开只能保证近似函数在展开点与原函数相等, 而不能保证在整体定义域内对原函数有较好的拟合程度, 因此本文采用SCA在每一次迭代中

对原子问题式(14)进行多次逼近。如图5所示, 近似值为子问题式(20)最优条件下的目标函数值, 将其最优解代入子问题式(14)可得到准确值。可以看到, 通过SCA后, 近似值与准确值可以保持在很小的误差范围, 说明1阶泰勒展开后的近似函数在通过SCA后, 可以很好地逼近原问题, 验证了所提算法的合理性。

图6给出了不同算法下, 系统总吞吐量与IRS元件数量的关系。随着IRS元件数量提升, 所提算法的总吞吐量提升速度高于单一优化IRS方法实现的总吞吐量。这是因为, 单一优化IRS的方法采用初始UAV的飞行轨迹, 这导致UAV始终与IRS保持较远的距离, 当UAV信号通过IRS反射至GUs时, 会经历严重的路径损耗。而所提出算法通过发挥UAV移动性, 使得UAV靠近IRS与GUs来获得更好的信道条件, 因此其吞吐量随IRS元件数量提升明显。同时, 单一优化UAV的方法所获得的总吞吐量和IRS元件数量间没有明确关系, 这是由于随机优化IRS相移不能保证信号在UAV处对齐合并, 甚至相互抵消。综上所述, 与单一优化方法相比, 所提出算法通过联合优化IRS相移与UAV轨迹, 可以实现更好的性能。

## 5 结论

本文研究了IRS辅助的UAV无线供能通信系统下资源分配问题。考虑了IRS和GUs的能量因果、IRS相移和UAV移动性等约束, 建立了多变量耦合

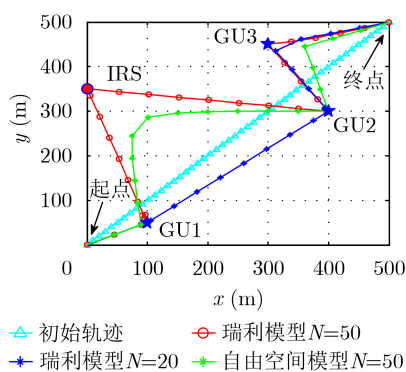


图3 不同参数下UAV轨迹

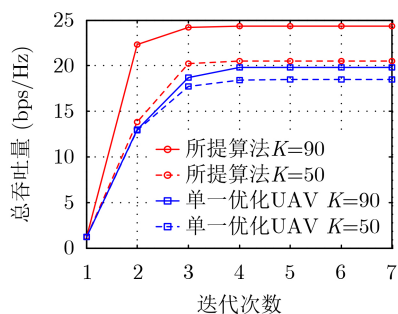


图4 算法收敛性验证

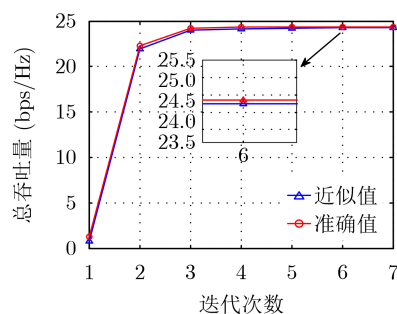


图5 SCA逼近程度验证图

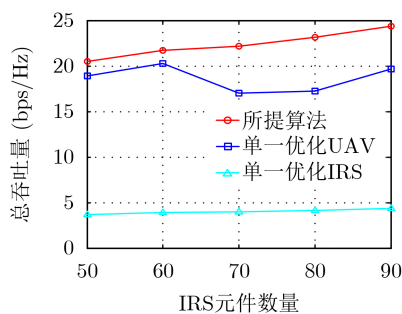


图6 总吞吐量与IRS元件数量的关系

的系统最大化总吞吐量问题。通过BCD方法将原问题分解为3个易于处理的子问题, 并利用三角不等式、引入松弛变量、1阶泰勒展开和SCA方法对子问题进行求解。数值仿真表明, 所提算法具有良好的收敛性, 且可以有效地提高系统总吞吐量。

### 参 考 文 献

- [1] LUO Weiran, SHEN Yanyan, YANG Bo, *et al.* Joint 3-D trajectory and resource optimization in multi-UAV-enabled IoT networks with wireless power transfer[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(10): 7833–7848. doi: [10.1109/JIOT.2020.3041303](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3041303).
  - [2] YANG Zhaohui, XU Wei, and SHIKH-BAHAEI M. Energy efficient UAV communication with energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(2): 1913–1927. doi: [10.1109/TVT.2019.2961993](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2961993).
  - [3] 徐勇军, 高正念, 王茜竹, 等. 基于智能反射面辅助的无线供电通信网络鲁棒能效最大化算法[J]. 电子与信息学报, 待发表. XU Yongjun, GAO Zhengnian, WANG Qianzhu, *et al.* Robust energy efficiency maximization algorithm for intelligent reflecting surface-aided wireless powered-communication networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, To be published.
  - [4] WU Qingqing and ZHANG Rui. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1838–1851. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2958916](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2958916).
  - [5] FANG Sisai, CHEN Gaojie, and LI Yonghui. Joint optimization for secure intelligent reflecting surface assisted UAV networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(2): 276–280. doi: [10.1109/LWC.2020.3027969](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3027969).
  - [6] MEI Haibo, YANG Kun, SHEN Jun, *et al.* Joint trajectory-task-cache optimization with phase-shift design of RIS-assisted UAV for MEC[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(7): 1586–1590. doi: [10.1109/LWC.2021.3074990](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3074990).
  - [7] ZOU Yuze, GONG Shimin, XU Jing, *et al.* Wireless powered intelligent reflecting surfaces for enhancing wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 12369–12373. doi: [10.1109/TVT.2020.3011942](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3011942).
  - [8] LI Jingyi, XU Sai, LIU Jiajia, *et al.* Reconfigurable intelligent surface enhanced secure aerial-ground communication[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(9): 6185–6197. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3086517](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3086517).
  - [9] RANJHA A and KADDOUM G. URLLC facilitated by mobile UAV relay and RIS: A joint design of passive beamforming, blocklength, and UAV positioning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(6): 4618–4627. doi: [10.1109/JIOT.2020.3027149](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3027149).
  - [10] CAO Xuelin, YANG Bo, HUANG Chongwen, *et al.* Reconfigurable intelligent surface-assisted aerial-terrestrial communications via multi-task learning[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(10): 3035–3050. doi: [10.1109/JSAC.2021.3088634](https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3088634).
  - [11] XIE Lifeng, XU Jie, and ZHANG Rui. Throughput maximization for UAV-enabled wireless powered communication networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 1690–1703. doi: [10.1109/JIOT.2018.2875446](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2875446).
  - [12] WU Qingqing and ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5394–5409. doi: [10.1109/TWC.2019.2936025](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2936025).
  - [13] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
  - [14] YOU Changsheng and ZHANG Rui. Hybrid offline-online design for UAV-enabled data harvesting in probabilistic LoS channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(6): 3753–3768. doi: [10.1109/TWC.2020.2978073](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2978073).
  - [15] YANG Gang, DAI Rao, and LIANG Yingchang. Energy-efficient UAV backscatter communication with joint trajectory design and resource optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(2): 926–941. doi: [10.1109/TWC.2020.3029225](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3029225).
- 刘志新: 男, 1976年生, 教授, 研究方向为无线通信网络资源优化分配与协同控制。  
赵松晗: 男, 1996年生, 博士生, 研究方向为智能反射面通信系统。  
杨毅: 女, 1983年生, 助理研究员, 研究方向为无线资源优化管理。  
袁亚洲: 男, 1985年生, 副教授, 研究方向为物联网技术与应用。

责任编辑: 余蓉