

## 基于能量收集的 IRS-UAV 无线传输方案<sup>①</sup>

王超<sup>②</sup> 郭辉<sup>③</sup>

(河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454003)

**摘要** 针对智能反射面(intelligent reflecting surface, IRS)联合无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)辅助无线通信系统的信息传输速率和能量消耗优化问题,提出了一种创新性的 IRS-UAV 无线中继传输方案。该方案结合了能量收集和时间切换技术,旨在通过 IRS-UAV 支持的能量收集来最大化系统的信息传输速率。在该方案中,IRS-UAV 先收集基站(base station, BS)发射的能量以维持自身运行,然后反射 BS 的能量给用户,最后用户利用收集的能量进行信息上传。这种能量收集和中继传输的结合为提高系统性能带来了显著优势。针对该方案中涉及的资源分配、相移矩阵和 IRS-UAV 位置等高度耦合的非凸优化问题,采用块坐标下降法进行了求解,有效降低了问题的复杂度。

**关键词** 智能反射面;无人机;无线供电通信网络;能量收集;块坐标下降法

智能反射面(intelligent reflecting surface, IRS)是近年来在无线通信传输领域迅速发展起来的新兴技术产品。IRS 通过调整自身的反射元件,不仅可以控制入射信号的幅值和相位<sup>[1-4]</sup>,还可以通过增强基站(base station, BS)与用户之间的通信连接,提高无线通信网络的性能<sup>[5-6]</sup>。文献[7]研究了 IRS 辅助无线信息和能量传输(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)多输入单输出非正交多址接入(nonorthogonal multiple access, NOMA)网络,通过联合优化连续干扰消除解码顺序、BS 传输波束形成矢量、功率分配比率和 IRS 相移来最小化 BS 发射功率的问题。文献[8]研究了下行链路 IRS 辅助 NOMA 网络,推导出中断概率的闭式表达式,并揭示了在高信噪比情况下,IRS 优于全双工解码和转发中继。文献[9]研究了 IRS 辅助上行链路 NOMA 网络,在连续相位和离散相位的情况下,通过优化 IRS 元素的反射相位,以低复杂度实现最大化系统信息的传输和速率。

在当前的大多数研究中,IRS 通常被固定安装

在墙壁上,这种做法不可避免地限制了其位置选择和通信环境,从而对无线通信性能产生了不利影响。相比之下,无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)以其卓越的机动性和较低的成本,能够适应各种复杂多变的环境,有效避免通信链路被遮挡的问题,进而显著提升无线通信网络的整体质量。在直接通信链路不可行的情况下,UAV 可以作为无线中继站,架设在发射机和接收机之间,建立起稳定可靠的连接。因此,UAV 的引入为 IRS 的位置部署提供了更多可能性,结合两者的优势,有望大幅提高无线通信网络的性能。文献[10]深入研究了 IRS 辅助的 UAV-NOMA 下行链路网络,通过优化 IRS-UAV 的位置、IRS 的发射波束成形和相移,成功实现了用户速率的最大化。

然而,已有研究大多集中于利用 UAV 和 IRS 提升系统信息传输速率,却往往忽略了能量消耗这一关键因素。在复杂的通信环境中,IRS 的能量消耗直接影响系统的整体性能。为此,本文创新性地结合了 UAV 与 IRS 的优势,提出了一种结合能量收集

① 河南省科技攻关基金(242102210193)和河南省高等学校重点科研基金(24A510004)资助项目。

② 男,2000年生,硕士生;研究方向:无线通信,UAV通信;E-mail:3329516108@qq.com。

③ 通信作者,E-mail:2614023@qq.com。

(收稿日期:2024-10-03)

(energy harvesting, EH) 和时间切换 (time switching, TS) 技术的传输方案,旨在解决 IRS 在信号反射过程中能量供应不足的问题。具体而言,该方案的操作过程分为 2 个阶段:下行能量收集阶段和上行信息传输 (information transmission, IT) 阶段。在下行 EH 阶段,IRS-UAV 不仅从 BS 收集能量,还将部分能量反射给用户。在上行 IT 阶段,IRS-UAV 通过在 BS 和用户之间建立通信连接,将用户发送的信号传输到 BS。通过部署 IRS-UAV,系统在不增加额外成本的情况下,显著提高了信息传输速率。

为了最大化系统信息传输速率和能量效率,本文针对 IRS-UAV 在信号传输过程中的资源分配、相移矩阵和位置优化等非凸问题,提出了使用块坐标下降 (block coordinate descent, BCD) 方法。仿真结果不仅验证了算法的有效性,而且与其他现有方案相比,特别是没有能量收集方案相比,IRS-UAV 可以从 BS 获取能量,并将其反射给用户,减少了对外部电源的依赖,提升了系统的能量自给自足能力。能量的收集和再利用减少了系统的总能耗,延长了系统的运行时间,最终提高了系统信息传输和速率与能量效率。

## 1 模型和问题表述

### 1.1 系统模型

如图 1 所示,该系统由 IRS-UAV、单天线 BS 和  $k$  个用户组成。IRS 是一个具有  $M$  个均匀线性阵列的无损元表面,并配有能量收集电路为其工作提供电力。IRS-UAV 为用户建立视线 (line of sight, LoS) 链路,并将信息传输到链路中的 BS。假设 BS 的单天线高度为  $h$ ,BS 的横坐标定义为  $\mathbf{w}_b = [x_b, y_b]^T$ ,第  $k$  个用户的坐标定义为  $\mathbf{w}_k = [x_k, y_k]^T, k \in K = \{1, \dots, K\}$ ,高度为 0,其中 T 表示矩阵的转置。UAV 飞行高度固定为  $H$ ,飞行周期为  $T$ ,将  $T$  平均划分为  $N$  个时隙,每个时隙持续时间为  $\delta$ 。IRS-UAV 的水平坐标定义为  $\mathbf{q}_n = [x_n, y_n]^T$ 。由于 UAV 的飞行能力有限,UAV 需要满足如下移动约束条件。

$$\|\mathbf{q}_n - \mathbf{q}_{n+1}\| \leq V_{\max} \delta, \forall n \in \{1, 2, \dots, N-1\} \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_1 = \mathbf{q}_I, \mathbf{q}_N = \mathbf{q}_F \quad (2)$$

式中:  $V_{\max}$  为 UAV 的最大速度,  $\mathbf{q}_I$  和  $\mathbf{q}_F$  分别为 UAV 的起始位置和结束位置。

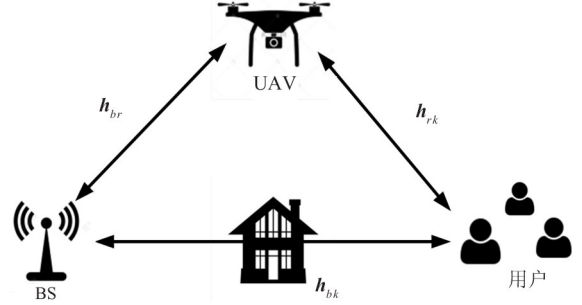


图 1 IRS-UAV 无线通信网络

整个过程分为 2 个阶段:(1)EH 阶段,BS 以固定功率  $P_0$  在时间  $\tau_1$  内通过通信链路向 IRS-UAV 提供能量,IRS-UAV 在时间  $\tau_2$  内帮助 BS 向用户发送能量;(2)信息传输阶段,IRS-UAV 利用在时间  $\tau_1$  内收集到的能量,帮助用户  $k$  在持续时间  $t_k$  内将信息传输到 BS。通过调整 IRS 相移矩阵,重新配置 EH 和 IT 无线信道,进一步提高系统性能。在 EH 阶段,IRS 的相移矩阵表示为  $\Theta_e$ 。在 IT 阶段,它由  $\Theta_{i,k}$  表示。假设该网络模型的所有信道状态信息都是已知的,从 UAV 到接收机的信道质量仅取决于它们之间的距离<sup>[11]</sup>。此外还假设了一个准静态的块衰落信道,其中信道在每个块中保持不变,只在块之间发生变化。IRS-UAV 到 BS、用户  $k$  到 IRS-UAV、用户  $k$  到 BS 在  $n$  时隙的基带等效信道链路为  $\mathbf{h}_{br}[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 、 $\mathbf{h}_{rk}[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  和  $\mathbf{h}_{bk}[n] \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ 。所有通道链接都遵循莱斯模型<sup>[12-15]</sup>,可以表示为

$$\mathbf{h}_{br}[n] = \sqrt{\beta_{br}[n]} \left( \sqrt{\frac{\rho}{\rho+1}} \mathbf{h}_{br}^{\text{LoS}}[n] + \sqrt{\frac{1}{\rho+1}} \mathbf{h}_{br}^{\text{NLoS}}[n] \right) \quad (3)$$

$$\mathbf{h}_{rk}[n] = \sqrt{\beta_{rk}[n]} \left( \sqrt{\frac{\rho}{\rho+1}} \mathbf{h}_{rk}^{\text{LoS}}[n] + \sqrt{\frac{1}{\rho+1}} \mathbf{h}_{rk}^{\text{NLoS}}[n] \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{h}_{bk}[n] = \sqrt{\beta_{bk}[n]} \tilde{\mathbf{h}}_k \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为莱斯因子,  $\beta_{br}[n] = \frac{\beta_0}{d_{br}^{\alpha_{br}}[n]}$ ,  $\beta_{bk}[n] =$

$$\frac{\beta_0}{d_{bk}^2[n]}, \beta_{rk}[n] = \frac{\beta_0}{d_{rk}^{\alpha_{rk}}[n]}, \alpha_{br} \text{ 和 } \alpha_{rk} \text{ 表示路径损耗指}$$

数,  $\beta_0$  表示参考距离为 1 m 时的信道功率。IRS-UAV 到 BS 的距离为  $d_{br}^{\alpha_{br}}[n] = \|\mathbf{w}_b - \mathbf{q}_n\|^2$ , IRS-UAV 到用户  $k$  的距离为  $d_{rk}^{\alpha_{rk}}[n] = \|\mathbf{w}_k - \mathbf{q}_n\|^2$ , BS 到用户  $k$  的距离为  $d_{bk}[n] = \|\mathbf{w}_k - \mathbf{w}_b\|^2$ 。用圆对称复高斯分布表示从 UAV 到用户的随机性。IRS-UAV 飞行时,无线通信信道主要受 LoS 组件影响。随着莱斯因子的增大,通道系数对自由空间路径损耗的依赖性增强。莱斯因子较大时,  $\sqrt{\frac{\rho}{1+\rho}} \mathbf{h}_{rk,n}^{\text{LoS}}[n] \gg$

$\sqrt{\frac{1}{1+\rho}} \mathbf{h}_{rk,n}^{\text{NLoS}}[n]$  [16-18]。常数衰落系数模型可以用来近似莱斯衰落信道。因此,式(3)和(4)可以改写为

$$\mathbf{h}_{br}[n] = \sqrt{\beta_{br}[n]} \sqrt{\frac{\rho}{\rho+1}} \mathbf{h}_{br}^{\text{LoS}}[n] \quad (6)$$

$$\mathbf{h}_{rk}[n] = \sqrt{\beta_{rk}[n]} \sqrt{\frac{\rho}{\rho+1}} \mathbf{h}_{rk}^{\text{LoS}}[n] \quad (7)$$

在下行 EH 阶段,BS 首先通过直连链路向 IRS-UAV 提供能量,然后通过 IRS-UAV 将能量传输给用户。IRS-UAV 收集的能量和第  $k$  个用户收集的能量分别表示为式(8)和(9)。在上行 IT 阶段,IRS 利用 EH 阶段收集的能量帮助用户将信息传输到 BS。在归一化带宽条件下,第  $k$  个用户的可达速率表示为式(10)。

$$E_R = \tau_1 \eta P_0 |\mathbf{h}_{br}[n]|^2 \quad (8)$$

$$E_k = \eta P_0 \tau_2 |\mathbf{h}_{br}^H[n] \Theta_e \mathbf{h}_{rk}[n] + \mathbf{h}_{bk}[n]|^2 + \eta P_0 \tau_1 |\mathbf{h}_{bk}[n]|^2 \quad (9)$$

$$R_k = t_k \log_2(1 + r_k) \quad (10)$$

式中:  $\eta \in (0,1]$  是能量转换效率;  $r_k = P_k |\mathbf{h}_{br}^H[n] \Theta_{i,k} \mathbf{h}_{rk}[n] + \mathbf{h}_{bk}[n]|^2 / \sigma^2$ ;  $P_k$  为第  $k$  个用户的发射功率;  $\sigma^2$  为高斯白噪声的方差;  $\Theta_e$  和  $\Theta_{i,k}$  分别为 EH 阶段和 IT 阶段的 IRS 相移矩阵,可以表示为  $\Theta_e = \text{diag}\{e^{-j\theta_{e,1}}, \dots, e^{-j\theta_{e,M}}\}$  和  $\Theta_{i,k} = \text{diag}\{e^{-j\theta_{i,k,1}}, \dots, e^{-j\theta_{i,k,M}}\}$ , 其中  $\theta_{e,m}$  和  $\theta_{i,k,m} \in [0, 2\pi)$ ,  $m \in M = \{1, \dots, M\}$ 。

## 1.2 问题公式化

本文目标是在能量收集的同时,通过优化 UAV 位置、IRS 相移矩阵和资源分配来最大化系统信息传输和速率。令  $\mathbf{P} = \{P_k, \forall k\}$ 、 $\mathbf{t} = \{t_k, \forall k\}$ 、 $\boldsymbol{\tau} =$

$[\tau_1, \tau_2]$  和  $\Theta_i = \{\Theta_{i,k}, \forall k\}$ 。因此,优化问题可以表示为

$$\text{P1: } \max_{\theta_e, \Theta_i, \tau, t, P, \mathbf{q}_n} \sum_{k=1}^K R_k \quad (11a)$$

$$\text{s. t. } P_k t_k \leq E_k, \forall k \quad (11b)$$

$$M\mu \left( \sum_{k=1}^K (t_k) + \tau_2 \right) \leq E_R \quad (11c)$$

$$\tau_1 + \tau_2 + \sum_{k=1}^K (t_k) \leq 1, \forall k \quad (11d)$$

$$0 \leq \theta_{e,m} < 2\pi, 0 \leq \theta_{i,k,m} < 2\pi, \forall m, k \quad (11e)$$

$$\tau_1, \tau_2, t_k \geq 0, \forall k \quad (11f)$$

$$P_k \geq 0, \forall k \quad (11g)$$

式(11b)表示第  $k$  个用户上行通信消耗的能量之和不大于第  $k$  个用户采集的能量之和;式(11c)表示每个 IRS 元件消耗的能量之和不能超过 IRS 储存的能量,其中表示每个 IRS 元件消耗的电路能量;式(11d)表示系统运行时间之和不能大于固定时隙。

## 2 优化算法

### 2.1 BCD 方法

BCD 方法在处理非凸优化问题时具有以下优点。(1)降低复杂度:通过将原问题分解为多个子问题,每个子问题相对独立且更容易求解,从而降低了整体优化问题的复杂度。(2)易于实现:每个子问题可以独立求解,便于在实际系统中实现和部署。(3)收敛性:在一定条件下,BCD 方法可以保证收敛到局部最优解,甚至全局最优解。

鉴于问题 P1 呈现出的非凸特性以及优化变量之间的高度耦合性,使得其直接求解变得异常复杂,因此可以使用 BCD 方法。BCD 方法擅长将复杂问题拆解为多个相对简单的子问题,从而显著降低求解的难度。正是基于这一优势,可以巧妙地将原问题 P1 细分为 3 个易于攻克子问题,并借助 BCD 方法的强大能力逐一进行求解。通过这种分而治之的策略,最终成功求解了原问题<sup>[19]</sup>。

### 2.2 功率和时间分配优化

在优化功率和时间分配时,需要先固定 UAV 的航迹  $\mathbf{q}_n$  和 IRS 的相移矩阵,然后将问题 P1 转化为

问题 P2。

$$P2: \max_{P, \tau, t} \sum_{k=1}^K \left[ t_k \log_2 \left( 1 + \frac{P_k \zeta_k}{\sigma^2} \right) \right] \quad (12a)$$

$$\text{s. t. 式(11b), (11c), (11e), (11f), (11g)}$$

$$(12b)$$

式中:  $\zeta_k = | \mathbf{h}_{br}^H[n] \Theta_{i,k} \mathbf{h}_{rk}[n] + \mathbf{h}_{bk}[n] |^2$ 。为了解决式(11b)的非凸性,决定引入松弛变量  $\Gamma_k = t_k P_k$ , 子问题 P2 可以重新表示为

$$P3: \max_{\Gamma_k, \tau, t} \sum_{k=1}^K \left[ t_k \log_2 \left( 1 + \frac{\Gamma_k \zeta_k}{t_k \sigma^2} \right) \right] \quad (13a)$$

$$\text{s. t. } \Gamma_k \leq E_k, \forall k \quad (13b)$$

$$E_k \geq 0, \forall k \quad (13c)$$

$$\text{式(11c), (11e), (11f)}$$

由于透视操作保持了凹性,问题 P3 是一个凸优化问题。因此,问题 P3 可以通过凸优化求解器(即 CVX<sup>[20-21]</sup>)进行求解。

### 2.3 IRS 相移优化

先固定  $P, \tau, t$  和由问题 P3 解决的  $q_n$ , 问题 P1 可以重新表述为

$$P4: \max_{\Theta_e, \Theta_{i,k}} | \mathbf{h}_{br}^H[n] \Theta_{i,k} \mathbf{h}_{rk}[n] + \mathbf{h}_{bk}[n] |^2 \quad (14a)$$

$$\text{s. t. } P_k t_k \leq \eta P_0 \tau_2 | \mathbf{h}_{br}^H[n] \Theta_{i,k} \mathbf{h}_{rk}[n] + \mathbf{h}_{bk}[n] |^2 \quad (14b)$$

$$\text{式(11e)}。$$

由于问题 P4 是非凸的,难以直接求解,所以选择分别解决。

#### 2.3.1 IT 的最佳相移设计

在 IT 阶段,IRS 和与直接链路相关联的链路相移进行对齐,实现 IRS 的最优相移<sup>[21-22]</sup>,即

$$\theta_{i,k,m}^* = \arg(\mathbf{h}_{bk}[n]) - \arg(\mathbf{h}_{br,m}^H[n]) - \arg(\mathbf{h}_{rk,m}[n]) \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{h}_{br,m}[n]$  是  $\mathbf{h}_{br}[n]$  的第  $m$  个元素,  $\mathbf{h}_{rk,m}[n]$  是  $\mathbf{h}_{rk}[n]$  的第  $m$  个元素。

#### 2.3.2 EH 的最佳相移设计

先令  $\mathbf{u}_e = [e^{-j\theta_{e,1}}, \dots, e^{-j\theta_{e,M}}]$ ,  $\bar{\mathbf{u}}_e = [\mathbf{u}_e^H, 1]^H$  和  $\bar{\mathbf{h}}_k = [\mathbf{h}_{br}^H[n] \mathbf{h}_{rk}[n], \mathbf{h}_{bk}[n]]^H$ , 然后再令  $\mathbf{U}_e = \bar{\mathbf{u}}_e \bar{\mathbf{u}}_e^H$  和  $\mathbf{H}_k = \bar{\mathbf{h}}_k \bar{\mathbf{h}}_k^H$ , 所以 P4 可以表示为

$$P5: \max_{\mathbf{U}_e} | \mathbf{h}_{br}^H[n] \Theta_{i,k} \mathbf{h}_{rk}[n] + \mathbf{h}_{bk}[n] |^2 \quad (16a)$$

$$\text{s. t. } P_k t_k \leq \tau_2 \eta P_0 [\text{Tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{U}_e) + | \mathbf{h}_{bk}[n] |^2], \forall k \quad (16b)$$

$$\text{rank}(\mathbf{U}_e) = 1, \mathbf{U}_e \geq 0 \quad (16c)$$

然而,约束式(16c)是非凸的,因此采用基于惩罚的方法来解决这个问题,可以提高准确率。约束条件  $\text{rank}(\mathbf{U}_e) = 1$  可以转化为直流电形式  $\| \mathbf{U}_e \|_* - \| \mathbf{U}_e \|_2 = 0$ , 其中  $\| \mathbf{U}_e \|_* = \sum_e \delta_e(\mathbf{U}_e)$  和  $\| \mathbf{U}_e \|_2 = \delta_1(\mathbf{U}_e) \circ \delta_e(\mathbf{U}_e)$  表示矩阵  $\mathbf{U}_e$  的第  $e$  个最大奇异值。那么,问题 P5 可以改写为

$$P6: \max_{\mathbf{U}_e} | \mathbf{h}_{br}^H[n] \Theta_{i,k} \mathbf{h}_{rk}[n] + \mathbf{h}_{bk}[n] |^2 + \kappa \| \mathbf{U}_e \|_* - \| \mathbf{U}_e \|_2 \quad (17a)$$

$$\text{s. t. 式(16b), } \mathbf{U}_e \geq 0 \quad (17b)$$

式中:  $\kappa$  为惩罚因子。问题 P6 是一个凸问题,可以用现有的凸优化求解器进行求解。

### 2.4 UAV 位置优化

对于一个给定的  $\Theta_e, \Theta_{i,k}, \tau, t, P$ , 问题 P1 仍然是非凸的。因此,引入 2 个松弛变量来解释这种非凸性,即  $a_k[n] = d_{bk}[n]$  和  $b[n] = d_{br}^{\alpha_{br}}[n]$ 。此外,还令  $\mathbf{a} = \{a_k[n], \forall k, n\}$  和  $\mathbf{b} = \{b[n], \forall n\}$ 。那么,问题 P1 重新表述为 P7。

$$P7: \max_{q_n, \mathbf{a}, \mathbf{b}} \sum_{k=1}^K \left[ t_k \log_2 \left( 1 + \gamma_k \left| \frac{A_k[n]}{a_k^{(\beta/2)}[n]} + \frac{B_k[n]}{b[n]} \right|^2 \right) \right] \quad (18a)$$

$$\text{s. t. } d_{bk}[n] \leq a_k[n], \forall k, n \quad (18b)$$

$$d_{br}^{\alpha_{br}}[n] \leq b[n], \forall n \quad (18c)$$

$$\text{式(1), (2), (11b), (11c)}。$$

式中:  $\gamma_k = P_k / \sigma^2$ , 和  $B_k[n] = \sqrt{\beta_0} \sum_{m=1}^M | \mathbf{h}_{rk,m}[n] |$ 。

注意,优化时必须满足式(18b)和(18c),因此,要通过减少  $a_k[n]$  和  $b[n]$  来增加和速率。然而,由于目标函数的凸性以及式(18b)、(18c)、(11b)和(11c)的非凸性,问题 P7 仍然是棘手的。

针对上述问题,采用连续凸逼近方法进行求解。对于给定的局部点  $\{a_{0,k}[n], \forall k, n\}$  和  $\{b_0[n], \forall n\}$ , 问题 P7 的目标函数近似为式(22)的一阶泰勒展开式。

$$M_{0,k}[n] = 1 + \frac{\gamma_k A_k^2[n]}{a_{0,k}^\beta[n]} + \frac{2\gamma_k A_k[n] B_k[n]}{a_{0,k}^{(\beta/2)}[n] b_0[n]} + \frac{\gamma_k B_k^2[n]}{b_0^2[n]} \quad (19)$$

$$M_{1,k}[n] = - \left( \frac{\gamma_k \beta A_k^2[n]}{a_{0,k}^{(\beta+1)}} + \frac{\gamma_k \beta A_k[n] B_k[n]}{b_0^2[n] a_{0,k}^{(\beta/2+1)}} \right) \quad (20)$$

$$M_{2,k}[n] = - \left( \frac{2\gamma_k B_k^2[n]}{b_0^3[n]} + \frac{2\gamma_k A_k[n] B_k[n]}{b_0^2[n] a_{0,k}^{(\beta/2)}} \right) \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_k A_k^2[n]}{a_k^\beta[n]} + \frac{2\gamma_k A_k[n] B_k[n]}{a_k^{(\beta/2)}[n] b[n]} + \frac{\gamma_k B_k^2[n]}{b^2[n]} \right) &\geq \\ \log_2 M_{0,k}[n] + \frac{M_{1,k}[n]}{M_{0,k}[n] \ln 2} (a_k[n] - a_{0,k}[n]) + & \\ \frac{M_{2,k}[n]}{M_{0,k}[n] \ln 2} (b[n] - b_0[n]) & \quad (22) \end{aligned}$$

利用信道状态信息的平均值来近似信道状态信息。BS 与用户之间的信道状态信息就可以表示为

$$\begin{aligned} | \mathbf{h}_{br}^H[n] \Theta_c \mathbf{h}_{rk}[n] + \mathbf{h}_{bk}[n] |^2 &\approx \beta_0 | \tilde{\mathbf{h}}_k |^2 / d_{bk}[n] + \\ M\beta_0^2 / (d_{rk}^{\alpha_{rk}}[n] d_{br}^{\alpha_{br}}[n]) & \quad (23) \end{aligned}$$

同样,基于一阶泰勒展开式,有

$$\begin{aligned} E_k &\geq Z_{0,k} + Z_{1,k} (a_k[n] - a_{0,k}[n]) + \\ Z_{2,k} (b[n] - b_0[n]) &= E_k^{lb} \quad (24) \end{aligned}$$

$$E_R \geq \zeta_1 \left( \frac{\beta_0}{b_0^2[n]} - \frac{2\beta_0}{b_0^3[n]} (b[n] - b_0[n]) \right) = E_R^{lb} \quad (25)$$

$$-a_k^2[n] \leq a_{0,k}^2[n] - 2a_{0,k}[n] a_k[n] \quad (26)$$

$$-b^2[n] \leq b_0^2[n] - 2b_0[n] b[n] \quad (27)$$

式中:  $Z_{2,k} = - (2\tau_2 \eta P_0 D / b_0^3[n])$ ,  $\zeta_1 = M\eta P_0 \tau_1$ ,  $Z_{0,k} = \tau_1 \eta P C_k / a_{0,k}^\beta[n] + \tau_2 \eta P_0 (C_k / a_{0,k}^\beta[n] + D / b_0^2[n])$ ,  $Z_{1,k} = - ((\tau_1 + \tau_2) \eta P_0 \beta C_k / a_{0,k}^{\beta+1}[n])$ ,  $C_k = \beta_0 | \tilde{\mathbf{h}}_k |^2$  和  $D = M\beta_0^2 / d_{rk}^{\alpha_{rk}}[n]$ 。利用上述泰勒展开式,可以将问题 P7 重新表述为问题 P8。问题 P8 是一个凸问题,可以通过标准求解器有效地解决 P8。

$$\text{P8: } \max_{a_n, a, b_k} \sum_{k=1}^K t_k \frac{M_{1,k}[n]}{M_{0,k}[n] \ln 2} a_k[n] + \frac{M_{2,k}[n]}{M_{0,k}[n] \ln 2} b[n] \quad (28a)$$

$$\text{s. t. } P_k t_k \leq E_k^{lb}, \forall k \quad (28b)$$

$$M\mu \left( \sum_{k=1}^K (t_k) + \tau_2 \right) \leq E_R^{lb} \quad (28c)$$

$$d_{bk}^2[n] + a_{0,k}^2[n] - 2a_{0,k}[n] a_k[n] \leq 0 \quad (28d)$$

$$d_{br}^{2\alpha_{br}}[n] + b_0^2[n] - 2b_0[n] b[n] \leq 0, \forall n \quad (28e)$$

式(1)和(2)。

### 3 仿真结果

#### 3.1 仿真参数设置

关于仿真参数设置,不失一般性。首先设置地面用户的位置为  $w_1 = [50, 100]^T$  m,  $w_2 = [40, 0]^T$  m,  $w_3 = [75, 100]^T$  m。BS 的水平位置是  $w_B = [50, 50]^T$  m, BS 的高度是  $H_B = 30$  m, BS 发射的功率为 100 dBm。UAV 的起始位置和结束位置分别为  $\mathbf{q}_1 = [0, 0]^T$  m 和  $\mathbf{q}_F = [100, 100]^T$  m。UAV 飞行高度为  $H_u = 30$  m。UAV 的飞行功率  $P_U = 40$  dBm, 最大速度为  $V_{\max} = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [23-24]。此外  $\sigma^2 = -144 \text{ dBm} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,  $\gamma = 10$ ,  $\beta_0 = -22 \text{ dB}$ ,  $T = 20 \text{ s}$ ,  $N = 50$ ,  $\mu = 10 \text{ dBm}$ ,  $\eta = 0.3$ ,  $\kappa = 0.5$  和  $M = 50$ 。

仿真考虑了系统在 6 种不同场景下的性能,其中场景 1 对应本文提出的方案,场景 2~6 用于对比分析。场景 1: 本文提出的方案。场景 2: IRS-UAV 固定在 (50, 50) 的水平位置。场景 3: IRS 的相位  $\Theta_{i,k}$  是随机生成的。场景 4: IRS 的能量反射、信息传输元素各为  $M/2$  个。场景 5: IRS-UAV 不用于辅助收集能量。场景 6: IRS-UAV 固定在 (50, 50) 的水平位置, IRS 在传输过程中相位随机。

#### 3.2 仿真结果分析

图 2 显示了 UAV 能量预算对 UAV 航迹优化的影响。由图 2 可知, UAV 的能量预算对其航迹优化有重要影响。UAV 飞行所需的最小能量  $G = 100 \text{ J}$ 。仿真中考虑了  $G, 3G, 5G$  和  $9G$  4 种不同的能量预算。随着能量预算的增加, UAV 可以逼近最优轨迹,从而提高系统信息传输性能。在飞行过程中, UAV 将寻找接近用户的方法,而不是直接飞行接近每个设备。此外,即使飞行时间难以满足所有设备的需求, UAV 仍然可以利用其灵活性靠近地面设备,提高信道增益。

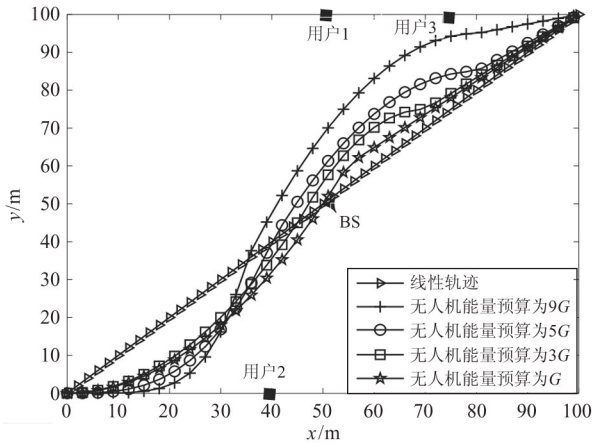


图 2 UAV 优化航迹

图 3 显示了本文算法与其他基准算法在不同迭代次数下的系统能量效率。由图 3 可知,与其他基准算法相比,本文算法在不同迭代次数下对提高系统能量效率表现出更好的效果,其性能优于其他算法。特别是与没有能量收集的方案相比,本文方案能够通过能量收集,从而进一步的提高整个系统的能量效率。能量收集通过从 BS 收集能量并将其反射给用户,IRS-UAV 可以减少对外部电源的依赖,从而提高整个系统的能量效率。这也体现了本文方案在无线供电通信网络 (wireless powered communication network, WPCN) 方面的研究更有优势和潜力。

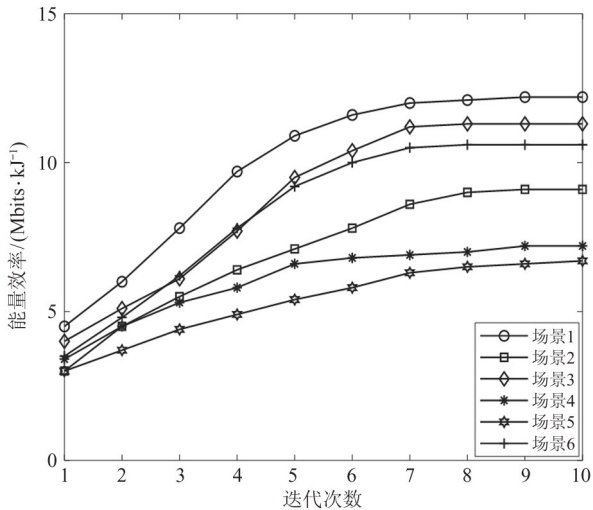


图 3 能量效率与迭代次数的关系

图 4 比较了所提算法与基准算法在系统信息传输和速率和 BS 发射功率方面的性能。从图 4 可以看出,随着功率的增加,所提算法在提高系统信息传

输和速率上优于其他基准算法,特别是明显优于没有能量收集的算法。这是因为随着功率的增加,IRS 可以存储更多的能量来传输信号,并可以提供更有效的波束成形服务,从而提高系统的 EH 和 IT 性能。

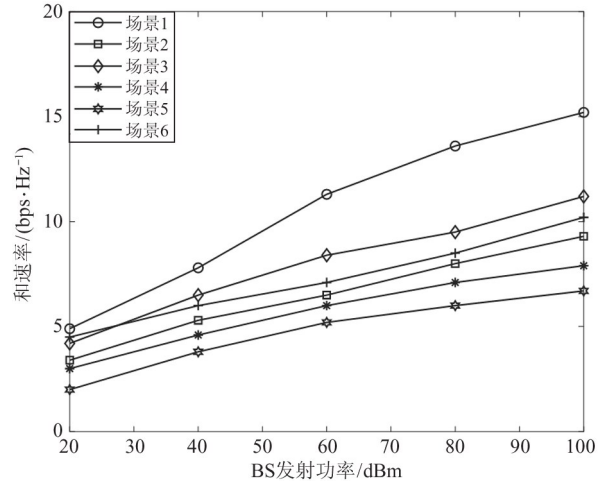


图 4 和速率与 BS 发射功率的关系

在图 5 中,将本文算法与基准算法在系统信息传输和速率和 IRS 元素  $M$  数量上进行了对比。从图 5 中可以看出,随着  $M$  的增加,所提算法与其他基准算法的总速率都在增加,但所提算法的表现明显优于其他基准算法。这是说明了 IRS 元素  $M$  也会影响系统信息传输和速率。 $M$  的增加可以提供更高效、更准确的波束成形服务,从而提高系统的 IT 性能;但是  $M$  增加到一定数量后就会增加能量消耗,对波束成形服务的提升就会越来越小,进而降低能量效率。

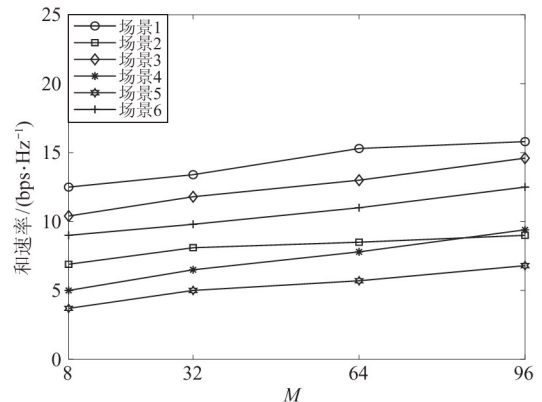


图 5 和速率与  $M$  的关系

### 3.3 对比分析

为了验证所提出方案的有效性,本文将仿真结果与其他现有方案进行了对比分析。与文献[10]相比,文献[10]研究了 IRS-UAV 辅助 NOMA 下行链路网络,通过优化 IRS-UAV 的位置,IRS 的发射波束成形和相移,来最大化用户的速率。如图 4 所示,本文提出的方案在不同发射功率下的信息传输和速率均显著高于文献[10]的方案。特别是在高功率水平下,本文方案的增益更为明显。这是因为本文方案结合了能量收集和时间切换技术,使得 IRS-UAV 能够更有效地利用能量资源,从而提高了系统的信息传输速率。

与文献[11]相比,文献[11]研究了 IRS 辅助上行链路 NOMA 网络,在连续相位和离散相位的情况下,通过优化 IRS 元素的反射相位,以较低复杂度最大化系统信息传输和速率。如图 5 所示,本文方案在不同用户数量下的信息传输和速率均高于文献[11]的方案。特别是在用户数量较多的情况下,本文方案的增益更为显著。这是因为本文方案利用了 UAV 的移动性,动态调整 IRS-UAV 的位置和相移矩阵,从而提高了系统的信息传输速率。

通过上述对比分析可以看出,本文提出的方案在提高系统信息的传输和速率与能量效率方面均优于已有文献的方法。这表明本文方案在提高系统的信息传输速率和能量效率方面具有显著的优势和潜力。

## 4 结论

本文提出了一种创新的无线传输方案,该方案融合了 IRS 辅助 UAV 系统、能量收集技术和时间切换技术,旨在最大化系统的信息传输速率和能量效率。该方案充分利用了 UAV 的移动性和 IRS 的可重构性,解决了 IRS 在信号反射过程中能量供给不足的问题。具体而言,IRS-UAV 能够从 BS 收集能量,并将这些能量反射给用户,从而减少对外部电源的依赖,显著提升系统的能量效率。此外,通过在不同时间段内进行能量收集和信息传输,该方案能够更有效地利用能量资源,避免能量的浪费。

该方案分为 2 个关键阶段:下行能量收集阶段和上行信息传输阶段。在下行能量收集阶段,IRS-UAV 从 BS 收集能量并将其反射给用户;在上行信息传输阶段,IRS-UAV 建立用户与 BS 之间的通信链路,中继用户的信号。为了解决与资源分配、相位移矩阵和 UAV 位置相关的非凸优化问题,本文采用了块坐标下降法。仿真结果表明,与其他现有方案相比,所提出的方案在提高系统的信息传输速率和能量效率方面表现更为优异。

结合能量收集和时间切换技术的传输方案可以提高能量效率,减少能耗。时间切换技术使得系统能够快速响应环境变化和用户需求,提高系统的适应性和灵活性。

通过在不同时间段内执行不同的任务,可以简化系统的设计和实现,降低复杂度。

然而,该方案并非完美无缺,仍存在一些不容忽视的缺陷。首先,能量收集的效率深受环境因素的制约,诸如光照、电磁波强度等变量的波动,很可能引发能量供应的不稳定性,进而对系统的正常运作构成威胁。其次,当能量收集与时间切换技术相结合时,系统的设计与实施难度急剧上升,对精确的信道状态信息以及复杂的算法支持提出了严苛的要求。此外,能量收集与信息传输之间的时间切换需依赖高精度的实时控制机制,这一需求无疑进一步加剧了系统的复杂性。更为严峻的是,能量收集过程本身可能耗时较长,导致系统在某些关键时段内难以及时获得所需能量,从而对信息传输造成不利影响。同时,涉及能量收集、时间切换、IRS 相移矩阵等多变量优化的非凸问题,其求解过程不仅异常复杂,而且可能需要耗费大量的计算时间和资源。这些挑战共同构成了该方案在实际应用中必须面对和克服的难题。

未来的研究可以进一步考虑以下几个方面:(1)在实际部署中,如何解决 IRS 元件的能量供给和相位校准等问题;(2)如何利用机器学习等技术,实现 IRS-UAV 系统的自适应优化;(3)将本文的方案拓展到多用户、多 IRS-UAV 的场景,探讨其性能表现。本文的研究为 IRS-UAV 系统的实用化应用提供了有益的理论和方法支持。

参考文献

- [ 1 ] Pan X, Zhang Z, Lin H, et al. RIS relaying UAV-aided WPCN for throughput maximization[C]//The 6th World Conference on Computing and Communication Technologies. Chengdu, China: IEEE, 2023:100 – 105.
- [ 2 ] Zeng Y, Zhang R, Lim T J, et al. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communication Magazine, 2016, 54:36 – 42.
- [ 3 ] Van Chien T, Ngo H Q, Chatzinotas S, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted cell-free massive MIMO systems over spatially-correlated channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21: 5106 – 5128.
- [ 4 ] Liu Z, Zhao S, Wu Q, et al. Joint trajectory design and resource allocation for IRS-assisted UAV communications with wireless energy harvesting [J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26:404 – 408.
- [ 5 ] Pang X, Sheng M, Zhao N, et al. When UAV meets IRS: expanding air-ground networks via passive reflection [J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28:164 – 170.
- [ 6 ] Wei Z, Cai Y, Sun Z, et al. Sum-rate maximization for IRS-assisted UAV OFDMA communication systems [J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2021, 20: 2530 – 2550.
- [ 7 ] Li Z, Chen W, Wu Q, et al. Joint beamforming design and power splitting optimization in IRS-assisted SWIPT NOMA networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21:1919 – 2033.
- [ 8 ] Cheng Y, Li K H, Liu Y, et al. The outage performance of downlink IRS-assisted NOMA systems[C]//2020 IEEE Global Communications Conference. Taipei, China: IEEE, 2020:1 – 6.
- [ 9 ] Choi J, Cantos L, Kim Y H. Low-complexity passive beamforming for IRS-aided uplink NOMA[C]//2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence. Jeju, Korea: IEEE, 2021: 831 – 833.
- [ 10 ] Jiao S, Fang F, Zhou X, et al. Joint beamforming and phase shift design in downlink UAV networks with IRS-assisted NOMA[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2020, 5:138 – 149.
- [ 11 ] Li X, Xie Z, Chu Z, et al. Exploiting benefits of IRS in wireless powered NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6: 175 – 186.
- [ 12 ] Guo H, Liang Y C, Chen J, et al. Weighted sum-rate maximization for intelligent reflecting surface enhanced wireless networks [C]//2019 IEEE Global Communications Conference. Waikoloa, USA: IEEE, 2019:1 – 6.
- [ 13 ] Nadeem Q U A, Kammoun A, Chaaban A, et al. Asymptotic max-min SINR analysis of reconfigurable intelligent surface assisted MISO Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19:7748 – 7764.
- [ 14 ] Luo Z Q, Ma W K, So A, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27:20 – 34.
- [ 15 ] Huang C, Zappone A, Alexandropoulos G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18:4157 – 4170.
- [ 16 ] Lu H, Zeng Y, Jin S, et al. Aerial intelligent reflecting surface: joint placement and passive beamforming design with 3d beam flattening [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 20(7):4128 – 4143.
- [ 17 ] Guo K, Wang C, Li Z, et al. Multiple UAV borne IRS-aided millimeter wave multicast communications: a joint optimization framework [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(11):3674 – 3678.
- [ 18 ] Al-Jarrah M, Al-Dweik A J, Alsusa E, et al. On the performance of IRS-assisted multilayer UAV communications with imperfect phase compensation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(12):8551 – 8568.
- [ 19 ] Bertsekas D P. Nonlinear programming [R]. 2nd ed. Belmont, USA: Athena Scientific, 1999.
- [ 20 ] Grant M, Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1. [EB/OL]. [2024 – 08 – 29]. <http://cvxr.com/cvx>.
- [ 21 ] Wu Q, Zhang R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18:5394 – 5409.
- [ 22 ] Ben-Tal A, Nemirovski A S. Lectures on modern convex optimization-analysis, algorithms, and engineering applications [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001.

- [23] Hua L, Yang Q, Wu C, et al. UAV assisted intelligent reflecting surface symbiotic radio system [ J ]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20: 5769 – 5785.
- [24] Zeng Y, Xu J, Zhang R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV [ J ]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18: 2329 – 2345.

## IRS-UAV wireless transmission scheme based on energy harvesting

Wang Chao, Guo Hui

(School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003)

### Abstract

Aiming at the optimization of information transmission rate and energy consumption of intelligent reflecting surface (IRS) combined unmanned aerial vehicle (UAV)-assisted wireless communication system, an innovative IRS-UAV wireless relay transmission scheme is proposed. The solution combines energy harvesting and time-switching technologies designed to maximize the system's information transfer rate through energy harvesting supported by the IRS-UAV. In this scheme, IRS-UAV first collects the energy emitted by the base station to maintain its own operation, then reflects the energy of the base station to the user, and finally the user uses the collected energy to upload information. This combination of energy harvesting and relay transmission offers significant advantages in improving system performance. For the highly coupled non-convex optimization problems such as resource allocation, phase shift matrix and IRS-UAV position, the block coordinate descending method is used to solve the problem, which effectively reduces the complexity of the problem.

**Key words:** intelligent reflecting surface, unmanned aerial vehicle, wireless powered communication network, energy harvesting, block coordinate descent method