

# 基于中继和智能反射面协同的无人机传输方法

罗屹洁, 侯志峰, 杨 旻

(陆军工程大学通信工程学院, 南京 210007)

**摘要:** 无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)通信和智能反射面(Intelligent reflecting surface, IRS)辅助通信是未来6G移动通信空地传输的典型场景,有机协同无人机和智能反射面辅助通信能够提升空地通信网络的传输性能。本文采用无人机全双工中继和搭载在其上的智能反射面被动反射共同协助空地传输,通过发射机的功率控制和智能反射面反射单元数目的联合优化,提升了系统能量效率。仿真结果表明,本文所提的方法优于单独采用无人机中继或者智能反射面辅助通信场景下的系统性能。

**关键词:** 智能反射面;无人机通信;能量效率;协同传输;分数规划

**中图分类号:** TN91      **文献标志码:** A

## Transmission Method of UAV Based on Cooperation of Relay and IRS

LUO Yijie, HOU Zhifeng, YANG Yang

(Communication Engineering College, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Unmanned aerial vehicle (UAV) communication and intelligent reflecting surface (IRS)-aided communication are typical air-ground transmission scheme in 6G mobile communication systems. It is available to enhance transmission performance of air-ground communication networks with cooperation of UAVs and IRSs. In this paper, by cooperating full-duplex UAV relay with passive reflecting of IRS, power control of the transmitter and reflecting element number of IRS are jointly optimized to improve energy efficiency. The simulation results show that the proposed method converges quickly and outperforms the UAV-relay-only and IRS-aided-only schemes.

**Key words:** intelligent reflecting surface(IRS); unmanned aerial vehicle (UAV) communication; energy efficiency; cooperative transmission; fractional programming

## 引 言

为了满足多样化异构的通信需求,基于第6代移动通信系统(The 6th mobile communication system, 6G)的应用场景向空天拓展,支持空天地海一体化通信是其追求的主要目标之一。无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)通信和智能反射面(Intelligent reflecting surface, IRS)辅助通信是6G移动通信场景中的组成部分,是未来移动通信的重要使能技术,结合两者的优势,取长补短,会给未来移动通信带来可预期的巨大增益<sup>[1]</sup>。

无人机通信因其部署方便、机动灵活、轨迹可控,具有视距通信链路,大大提升了移动通信传输速率且增大了蜂窝网络覆盖面积,能使地面蜂窝网络向空中延伸,构建立体机动的空地通信网络<sup>[2]</sup>。但由于无人机主要依靠机上电池供电,其所能提供的能量受限,使得空地传输的能量效率不高;同时在城市低高度(50~150 m)飞行的无人机与地面用户之间的空地链路易受高大建筑物的阻挡,使得传输性能大打折扣。

智能反射面也叫大规模智能表面(Large intelligent surface, LIS),通常是部署或者安装在建筑物墙面或者升空平台等上面的光滑平面,由大规模的无源或者有源阵列单元组成,可以通过调节入射信号的幅度和相位达到辅助和增强无线通信的目的。智能反射面因其耗能低、具有较好的能量效率、频谱效率和较低的硬件成本,以及对于无线环境的智能调控等优点,成为目前的一个研究热点。智能反射面辅助通信可以完美地弥补无人机通信能量受限和易被高大建筑物阻挡这两个缺点。一方面,智能反射面采用被动反射的方式转发信号,能耗低;另一方面,智能反射面可以通过对无线环境的智能调控,增强空地链路的“视距”通信效果<sup>[3]</sup>。

在无人机上部署智能反射面,由于空地链路会比地地链路遭受低得多的信道损耗,这意味着可以大大减小能量损耗。除此之外,无人机的移动性给智能反射面动态调整部署位置的能力,可以充分利用动态环境来提升通信性能。因此,无人机和智能反射面的协同传输可以大大提升空地通信网络的传输性能。如文献[4]考虑用智能反射面的动态部署代替静态部署,即将智能反射面搭载在无人机上,通过无人机的航迹规划进一步提升空地传输抗干扰能力。文献[5]采用Q学习和神经网络的方法调整无人机的位置和智能反射面的发射系数来最大化下行传输容量,仿真结果表明无人机搭载的智能反射面比静止的智能反射面在平均传输速率和视距通信可能性上都有大的提升。文献[6]考虑将智能反射面部署在无人机上,在假设信道状态信息已知的条件下,通过联合优化多天线基站的波束成形和智能反射表面的相位偏移来提升基站到蜂窝边缘用户的能量效率。文献[7]提出一种新型深度强化学习的方法部署无人机搭载智能反射面提升毫米波频段对多个用户的下行传输性能。

虽然这些研究通过无人机的机动性增强了智能反射面辅助通信的传输性能,但都只把无人机当作搭载工具,将其高度或者轨迹作为优化的策略之一。而在空地通信系统中,无人机本身就可以作为基站、中继或者用户等存在,参与到空地通信网络的数据传输中<sup>[8]</sup>。如文献[9]初步发掘了运用智能反射面改进蜂窝通信网络和无人机用户之间传输性能的潜能,通过智能反射面部署的高度和与基站的距离来提升蜂窝网络的覆盖和飞行无人机用户的吞吐量。同时,在无人机和智能反射面协同传输的方案中,也可以积极发挥无人机作为中继通信的主动性。如文献[10]不仅考虑了无人机和智能反射面不同参数的联合优化,还进一步探讨了无人机和智能反射面的协同传输方案设计,对比考察了只有无人机作为中继的模式、只有智能反射面作为中继的模式以及无人机和智能反射面都作为中继的模式,通过智能反射面反射单元的数目以及无人机的高度优化来最大化系统的能量效率。

综上所述,目前无人机和智能反射面协同空地传输技术的研究还刚刚展开,存在的不足很多,主要有以下几点:首先,大部分关于无人机和智能反射面协同传输研究中,对于空地链路的信道假设过于理想;其次,无人机和智能反射面之间协同传输机制考虑不够,大部分都只将无人机作为搭载工具;最后,考虑无人机和智能反射面协同传输的能量效率方面的研究还较少。因此,本文考虑在低高度无人机所面临的复杂电磁环境下,采用无人机全双工中继转发和智能反射面被动反射并行的协同传输方案,联合优化发射机的发射功率和智能反射面的反射单元数目来最大化空地通信网络的能量效率,并且进一步探讨无人机高度对系统能量效率的影响。

## 1 系统模型和问题描述

### 1.1 系统模型

本文考虑如图1所示的空地通信网络,假设在发射机与接收机之间存在障碍物,合法信号只能通过转发送达终端用户,存在两种转发方式:(1)无人机可以通过全双工中继的方式转发合法用户的信号;(2)搭载在无人机上的智能反射面可以通过被动反射的方式转发合法用户的信号。

假设源节点 $S$ 和目的节点 $D$ 都在地面上,其中二维坐标分别为 $W_S=(X_S, Y_S)$ ,  $W_D=(X_D, Y_D)$ 。假设智能反射表面 $R$ 搭载在无人机 $U$ 上,并且无人机可以飞行在某一高度 $h$ ,无人机的三维坐标则分别为 $W_U=(X_U, Y_U, h)$ 。因此,无人机和目的节点的俯仰角可以分别表示为

$$\theta_S = \arctan\left(\frac{h}{|W_U - W_S|}\right) \quad (1)$$

$$\theta_D = \arctan\left(\frac{h}{|W_U - W_D|}\right) \quad (2)$$

无人机和收发双方之间的通信会以一定的概率存在着视距和非视距链路,而这个概率是俯仰角的函数,即

$$p_{\text{LoS}}(\theta_i) = (1 + a \exp(-b(\theta_i - a)))^{-1} \quad \forall i \in \{S, D\} \quad (3)$$

式中 $a$ 和 $b$ 取决于无人机的高度和周围建筑物的高度和密度等环境因素,可根据国际电信联盟(International telecommunication union, ITU)中相关的参数 $\alpha, \beta, \gamma$ 确定,表达式为

$$z = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^{3-j} C_{ij} (\alpha\beta)^i \gamma^j \quad z \in \{a, b\} \quad (4)$$

式中: $\alpha, \beta, \gamma$ 的取值采用城市场景的典型值(0.3, 500, 15), $a$ 和 $b$ 对应的参数 $C_{ij}$ 根据文献[11]确定。

无人机空地链路之间的路径损耗因子和地面用户与无人机之间的俯仰角有关,因此根据文献[11, 12],确定随着俯仰角变化的路径损耗因子为

$$\alpha(\theta) = LP_{\text{LoS}}(\theta) + J \quad (5)$$

式中: $L = \alpha_{\frac{\pi}{2}} - \alpha_0$ ;  $J = \alpha_0$ ; 而 $\alpha_{\frac{\pi}{2}}$ 和 $\alpha_0$ 的典型值为2和3.5。

同时假设小尺度衰落满足莱斯分布,并且莱斯分布因子为

$$k(\theta) = K e^{H\theta} \quad (6)$$

式中: $K = \kappa_0$ ;  $H = \frac{2}{\pi} \ln\left(\frac{\kappa_{\frac{\pi}{2}}}{\kappa_0}\right)$ ;  $\kappa_0$ 和 $\kappa_{\frac{\pi}{2}}$ 的典型值为5 dB和15 dB。

### 1.2 问题描述

假设基站发射信号 $x$ ,分别通过无人机的全双工中继和智能反射面被动反射两种协助方式传输,然

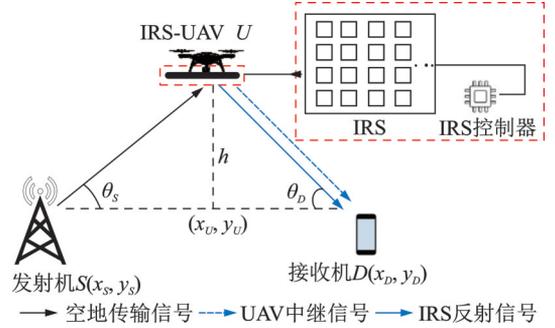


图1 系统模型

Fig.1 System model

后在目的节点采用最大比合并接收。为了对比本文所提方案的优越性,下面分别讨论单独采用其中一种转发方式下的信号传输方案。

### 1.2.1 只采用无人机中继转发的情形

假设无人机采用全双工中继的方式转发从发射机收到的信号,并且考虑了全双工中继时的自干扰影响,则无人机接收到的信号,以及通过无人机转发到达目的节点的信号可以表示为

$$y_U = \sqrt{G p_S d_{SU}^{-\alpha(\theta_S)}} h_{SU} x + R_I + n_U \quad (7)$$

$$y_D = \sqrt{G p_U d_{UD}^{-\alpha(\theta_D)}} h_{UD} y_U + n_D \quad (8)$$

式中: $p_S$ 和 $p_U$ 分别为发射机的发射功率和无人机的转发功率; $G$ 为与环境和频率有关的常数,表示信号的放大系数; $d_{SU}^{-\alpha(\theta_S)}$ 、 $d_{UD}^{-\alpha(\theta_D)}$ 分别为发射机到无人机、无人机到目的节点的路径损耗; $h_{SU}$ 、 $h_{UD}$ 分别为它们之间的小尺度衰落; $R_I$ 为无人机采用全双工中继方式下的自干扰; $n_i, i \in \{U, D\}$ 为用户接收到的高斯白噪声。

相应地,它们接收到的信干噪比(Signal-to-interference-plus-noise-ratio, SINR)可以表示为

$$\gamma_U = p_S \frac{G}{R_I + N_0} d_{SU}^{-\alpha(\theta_S)} |h_{SU}|^2 \quad (9)$$

$$\gamma_D = p_U \frac{G}{N_0} d_{UD}^{-\alpha(\theta_D)} |h_{UD}|^2 \quad (10)$$

式中 $N_0$ 为白噪声的功率。

假设无人机采用的是译码转发协议,则最终从源节点到目的节点的信干噪比SINR为

$$\gamma_{UAV\_ONLY} = \min(\gamma_U, \gamma_D) \quad (11)$$

只通过无人机中继获得的可达速率为

$$R_{UAV\_ONLY} = \log_2(1 + \gamma_{UAV\_ONLY}) \quad (12)$$

### 1.2.2 只采用智能反射面被动反射的情形

假设智能反射面上的反射单元个数为 $N$ 。当智能反射面被动反射源信号,而无人机只是作为搭载工具时,目的节点接收到的通过第 $k$ 个反射单元反射后的信号可以表示为

$$y_{IRS_k} = \sqrt{G p_S d_{S_k}^{-\alpha(\theta_{S_k})}} h_{S_k} e^{j(\phi_k)} \sqrt{G d_{D_k}^{-\alpha(\theta_{D_k})}} h_{D_k} x + n_D \quad (13)$$

式中: $\phi_k$ 为第 $k$ 个反射单元的相位偏移; $d_{S_k}^{-\alpha(\theta_{S_k})}$ 、 $d_{D_k}^{-\alpha(\theta_{D_k})}$ 分别为发射机到智能反射面第 $k$ 个反射单元以及第 $k$ 个反射单元到目的节点的路径损耗; $h_{S_k}$ 、 $h_{D_k}$ 分别为从发射机到智能反射面第 $k$ 个反射单元以及第 $k$ 个反射单元到目的节点的小尺度衰落。

根据文献[10],通过智能反射面转发的源节点到目的节点的信干噪比SINR为

$$\gamma_{IRS\_ONLY} = \frac{G^2 p_S}{N_0} \left( \sum_{k=1}^N d_{S_k}^{-\frac{\alpha(\theta_{S_k})}{2}} d_{D_k}^{-\frac{\alpha(\theta_{D_k})}{2}} |h_{S_k}| |h_{D_k}| \right)^2 \quad (14)$$

由于无人机和智能反射面的尺寸有限,假设发射机到第 $k$ 个智能反射单元的距离近似为发射机到无人机的距离;同样地,假设接收机到第 $k$ 个智能反射单元的距离近似为接收机到无人机的距离。也就是说,假设 $d_{S_k} \approx d_{SU}$ ,  $d_{D_k} \approx d_{UD}$ ,  $\theta_{S_k} \approx \theta_S$ ,  $\theta_{D_k} \approx \theta_D$ ,那么就可以用 $\alpha(\theta_S)$ 代替 $\alpha(\theta_{S_k})$ , $\alpha(\theta_D)$ 代替 $\alpha(\theta_{D_k})$ ,因此,式(14)可以近似为

$$\gamma_{IRS\_ONLY} = \frac{G^2 p_S}{N_0} \left( \sum_{k=1}^N d_{S_k}^{-\frac{\alpha(\theta_{S_k})}{2}} d_{D_k}^{-\frac{\alpha(\theta_{D_k})}{2}} |h_{S_k}| |h_{D_k}| \right)^2 \approx \frac{G^2 p_S}{N_0} d_{SU}^{-\alpha(\theta_S)} d_{UD}^{-\alpha(\theta_D)} \left( \sum_{k=1}^N |h_{S_k}| |h_{D_k}| \right)^2 \quad (15)$$

通过分析,可以得到只通过智能反射面反射获得的可达速率为

$$R_{\text{IRS\_ONLY}} = \log_2(1 + \gamma_{\text{IRS\_ONLY}}) \quad (16)$$

接着分析无人机和智能反射面在转发过程中消耗的能量。无论采用哪种转发方式都需要消耗的能量有

$$C = p_s + p_I + p_h + p_C \quad (17)$$

式中:  $p_I$ 、 $p_h$ 、 $p_C$  分别为无人机搭载智能反射面的功率、无人机悬停的功率以及电路功率。

### 1.2.3 无人机和智能反射面协同传输的情形

通过以上的分析,一方面考虑采用两种不同的协同传输方式都可以提升系统的传输速率,另一方面也需要考虑采用了协同传输方式会带来额外的功率消耗,因此采用系统的能量效率来表征传输速率的提升和能量消耗之间的折衷。如果采用无人机转发,在直接传输的基础上还需要消耗无人机的转发功率  $p_U$ ;采用智能反射面反射,在智能反射面单元数目较多的情况下反射功率不能忽略,则需要消耗的反射功率  $p_{\text{IRS}} = Np_r$ ,与反射单元的数目和每个单元的相位精度调整功率成正比。因此,采用两种转发协同传输模式下的总功率为

$$p_{\text{UAV\_IRS}} = p_U + p_{\text{IRS}} + C \quad (18)$$

利用 Jensen 不等式,可以获得在无人机全双工中继和智能反射面反射下各态历经的传输容量的上界,为  $E[\log_2(1 + \gamma_{\text{UAV\_ONLY}} + \gamma_{\text{IRS\_ONLY}})] \leq \log_2\{1 + E[\gamma_{\text{UAV\_ONLY}}] + E[\gamma_{\text{IRS\_ONLY}}]\}$ ,则通过推导获得系统近似的能量效率为

$$\text{EE} \approx \frac{\log_2\{1 + E[\gamma_{\text{UAV\_ONLY}}] + E[\gamma_{\text{IRS\_ONLY}}]\}}{p_{\text{UAV\_IRS}}} \quad (19)$$

本文优化的目标是最大化其能量效率,而由于硬件尺寸和功率消耗的限制,发射机的发射功率和智能反射面的反射单元数都存在一定的取值范围,综合考虑以上因素,本文最终的优化问题描述为

$$\begin{cases} \text{P1: max EE} \\ \quad \quad \quad p_s, N \\ \text{s.t. } p_{\text{MIN}} \leq p_s \leq p_{\text{MAX}} \\ \quad \quad N_{\text{MIN}} \leq N \leq N_{\text{MAX}} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $p_{\text{MIN}}$ 、 $p_{\text{MAX}}$  分别为发射机发射功率的最小值和最大值;  $N_{\text{MIN}}$ 、 $N_{\text{MAX}}$  分别为智能反射面反射单元数目的最小值和最大值。

从前面的分析可以看出,增大发射机发射功率或者智能反射面反射单元数目都可以提升系统的传输速率,但同时也都会增加系统的能量消耗,因此要最大化系统的能量效率,就存在最佳的发射机发射功率和智能反射单元数目,下面基于分数规划理论<sup>[13]</sup>求解以上的优化问题。

## 2 优化问题求解和算法描述

### 2.1 优化问题求解

由于以上的优化问题是一个多参数优化问题,没法直接通过凸优化理论和方法进行求解,因此将以上的优化问题分解成两个子问题:(1)在假定智能反射单元数目已知的前提下,求解发射机的最佳发射功率;(2)在获得发射机最佳发射功率之后,再求解最佳的反射单元数目。然后,通过交叉迭代的方式,获得最终的最佳发射功率和反射单元数目。

#### 2.1.1 最佳发射功率求解

首先,在假设反射单元数目一定的情况下,根据分数规划理论将以上的分数优化问题转化为两个函数之差,即以上的优化问题转化为

$$\begin{cases} \text{P2: } y(p_S, \lambda_U) = R_{\text{UAV,IRS}}(p_S) - \lambda_U p_{\text{UAV,IRS}}(p_S) \\ \text{s.t. } p_{\text{MIN}} \leq p_S \leq p_{\text{MAX}} \\ N_{\text{MIN}} \leq N \leq N_{\text{MAX}} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $R_{\text{UAV,IRS}} = \log_2 \{1 + E[\gamma_{\text{UAV,ONLY}}] + E[\gamma_{\text{IRS,ONLY}}]\}$ ;  $\lambda_U$  为引入的参数。

将式(21)对发射机发射功率求偏导并令其等于零,得

$$\frac{\partial}{\partial p_S} y(p_S, \lambda_U) = \frac{\partial}{\partial p_S} [R_{\text{UAV,IRS}}(p_S) - \lambda_U p_{\text{UAV,IRS}}(p_S)] = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\kappa_S + \kappa_I}{\ln[2(1 + \kappa_S p_S + \kappa_I p_S)]} - \lambda_U = 0 \quad (23)$$

式中:  $\kappa_S = \frac{G}{R_I + N_0} d_{\text{SU}}^{-\alpha(\theta_S)} E[|h_{\text{SU}}|^2]$ ;  $\kappa_I = \frac{G^2}{N_0} d_{\text{SU}}^{-\alpha(\theta_S)} d_{\text{UD}}^{-\alpha(\theta_D)} E\left[\left(\sum_{k=1}^N |h_{\text{S}_k}||h_{\text{D}_k}|\right)^2\right]$ 。 则

$$p_S^* = \frac{1}{\ln(2\lambda_U)} - \frac{1}{\kappa_S + \kappa_I} \quad (24)$$

考虑到边界条件,则最佳的发射功率为

$$p_S^{\text{opt}} = \begin{cases} p_{\text{MIN}} & p_S^* < p_{\text{MIN}} \\ p_S^* & p_{\text{MIN}} \leq p_S^* \leq p_{\text{MAX}} \\ p_{\text{MAX}} & p_S^* > p_{\text{MAX}} \end{cases} \quad (25)$$

在求得最佳发射功率时,  $\lambda_U^* = \frac{R_{\text{UAV,IRS}}(p_S^{\text{opt}})}{p_{\text{UAV,IRS}}(p_S^{\text{opt}})}$  表示获得的最佳能量效率。

### 2.1.2 最佳反射单元求解

考虑智能反射面反射单元数目的优化,同样根据能量效率的表达式,利用分数优化理论将除法转化为减法进行优化,再进行求解。无人机中继获得的传输速率与智能反射面反射单元的数目无关,因此将能量效率表达式展开为

$$\text{EE} = \frac{\log_2 \left\{ 1 + E[\gamma_{\text{UAV,ONLY}}] + \frac{G^2}{N_0} d_{\text{SU}}^{-\alpha(\theta_S)} d_{\text{UD}}^{-\alpha(\theta_D)} E\left[\left(\sum_{k=1}^N |h_{\text{S}_k}||h_{\text{D}_k}|\right)^2\right] \right\}}{p_S + p_U + p_{\text{IRS}} + C} \quad (26)$$

考虑到信道衰落满足莱斯分布,根据文献[14],得到  $E\left[\sum_{k=1}^N |h_{\text{S}_k}||h_{\text{D}_k}|\right]^2 = v + (N + 1)\lambda'$ , 其中  $v$  为非

中心卡方分布的自由度,  $\lambda' = \frac{1}{2} \frac{(E[|h_{\text{S}_k}||h_{\text{D}_k}|])^2}{\text{var}(|h_{\text{S}_k}||h_{\text{D}_k}|)}$ , 而  $p_{\text{IRS}} = Np_r$ , 代入式(26)根据文献[10], 得到

$$\text{EE} = \frac{\log_2 \left\{ 1 + E[\gamma_{\text{UAV,ONLY}}] + \frac{G^2 p_S}{N_0} d_{\text{SU}}^{-\alpha_S} d_{\text{UD}}^{-\alpha_D} [v + (N + 1)\lambda'] \right\}}{p_S + p_U + Np_r + C} \quad (27)$$

因为分子分母都是反射单元数目的单调增函数,根据分数优化理论,对式(27)进行如下变换。首先令

$f = \log_2 \left\{ 1 + E[\gamma_{\text{UAV,ONLY}}] + \frac{G^2 p_S}{N_0} d_{\text{SU}}^{-\alpha_S} d_{\text{UD}}^{-\alpha_D} [v + (N + 1)\lambda'] \right\}$ ,  $g = p_S + p_U + Np_r + C$ , 则式(27)

转化为  $F = f - \lambda_I g$ ,  $\lambda_I$  为引入的参数,将其对  $N$  求偏导,并令  $M = \frac{G^2}{N_0} d_{\text{SU}}^{-\alpha_S} d_{\text{UD}}^{-\alpha_D}$ , 得到

$$\frac{\partial F}{\partial N} = \frac{1}{\ln 2} \frac{Mp_s \lambda'}{1 + \kappa_s p_s + Mp_s v + Mp_s (N+1) \lambda'} - \lambda_l p_r \quad (28)$$

令其等于0,得到

$$N^* = \left\lceil \frac{1}{\ln(2\lambda_l p_r)} - \frac{1 + Mp_s v + \kappa_s p_s}{Mp_s \lambda'} - 1 \right\rceil \quad (29)$$

同样考虑到边界条件,则最佳的反射单元数目为

$$N^{\text{opt}} = \begin{cases} N_{\text{MIN}} & N^* < N_{\text{MIN}} \\ N^* & N_{\text{MIN}} \leq N^* \leq N_{\text{MAX}} \\ N_{\text{MAX}} & N^* > N_{\text{MAX}} \end{cases} \quad (30)$$

## 2.2 算法描述和性能分析

根据以上分析,本文设计了分层的Dinkelbach's算法,其主要思想是首先固定智能反射面的反射单元数目,根据式(24,25),求解出最佳的发射机发射功率,然后在此基础上,再根据式(29,30)求解出最佳的反射单元数目,通过交叉迭代,最终获得最佳的无人机和智能反射面协同传输策略。其中Dinkelbach's算法<sup>[15]</sup>是一种迭代算法,用来解决非线性分数规划问题,它的主要思想是引入辅助参数,将分数规划问题转化为分子和分母之差,再通过凸优化进行求解,通常用在求解能量效率最大化问题中,如文献[16-18],算法简单有效,收敛速度快。具体的算法描述如下所示。

初始化: $\lambda_U, \lambda_l, p_{\text{MIN}}, p_{\text{MAX}}, N_{\text{MIN}}, N_{\text{MAX}}$

循环:

- (1)固定智能反射单元数目,根据式(24)计算发射机发射功率的极大值,然后根据边界条件,由式(25)确定最佳的发射功率;
- (2)求解最佳发射功率下的系统能量效率;
- (3)在发射功率确定的情况下,根据式(29)求解反射单元数目的极大值,然后根据边界条件,根据式(30)确定最佳的反射单元数目;
- (4)求解最佳反射单元数目下的系统能量效率;
- (5)更新 $\lambda_l$ ,跳转到步骤(3),直到内部循环次数达到最大值;
- (6)更新 $\lambda_U$ ,跳转到步骤(1),直到外部循环次数达到最大值;
- (7)通过交叉迭代,最终获得最佳的传输策略(包括最佳发射功率和最佳反射单元数目)。

## 3 仿真结果分析和讨论

### 3.1 仿真参数设置

假设智能反射表面搭载在无人机上,无人机在不同高度盘旋(考虑的是低高度的无人机,盘旋高度在50~150 m之间)。由于障碍物的遮挡,收发信机之间通过无人机的全双工中继和智能反射面的被动反射实现数据的传输。假设发射机最大的发射功率是30 W,每个智能反射单元消耗的功率为78 mW,由于数目较多,不能完全忽略不计,噪声功率为 $10^{-17}$  W。

### 3.2 仿真结果分析

首先分析所提算法的收敛情况,如图2所示。假设发射机和接收机的坐标分别为 $W_S=(0,0)$ , $W_D=(1000,0)$ ,无人机高度固定在100 m,其地面投影坐标为(100,0)。从图2可以看出,通过本文提出的算法可以很快获得最佳的发射机发射功率和最佳的智能反射面反射单元数目使得系统能量效率最大化<sup>[19]</sup>。图3考虑了无人机高度对系统能量效率的影响,显示了源节点与无人机地面投影的距离分

别是 100、200 和 300 m 条件下的能量效率。从图 3 中可以看出,在投影距离分别为 200 和 300 m 时,系统能量效率随着无人机的高度增大而增大,而投影距离在 100 m 时,能量效率随着无人机高度的增大先增大后减小。原因可能是一方面无人机高度的增大可以提高视距通信的概率,从而提升传输速率;但另一方面,无人机高度的增大又会增加其与发射机之间的距离,从而降低传输速率,因此存在最佳的无人机高度优化系统的能量效率。

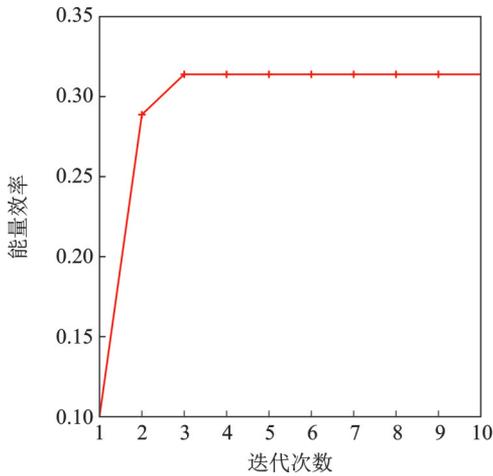


图 2 能量效率随着迭代次数的收敛曲线

Fig.2 Convergence curves of energy efficiency with numbers of iteration

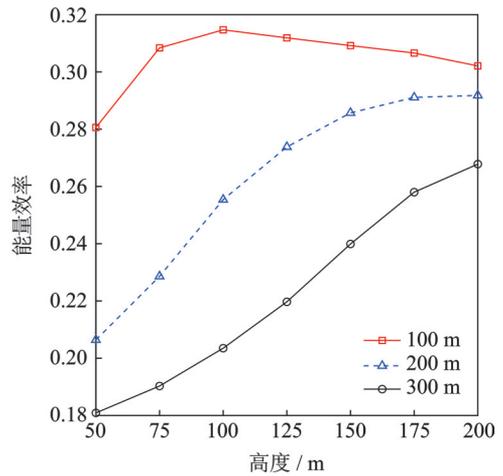
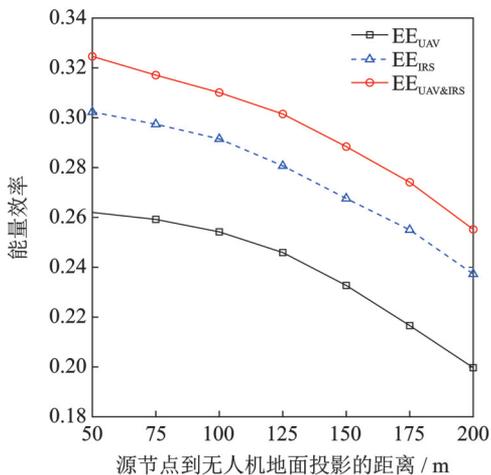


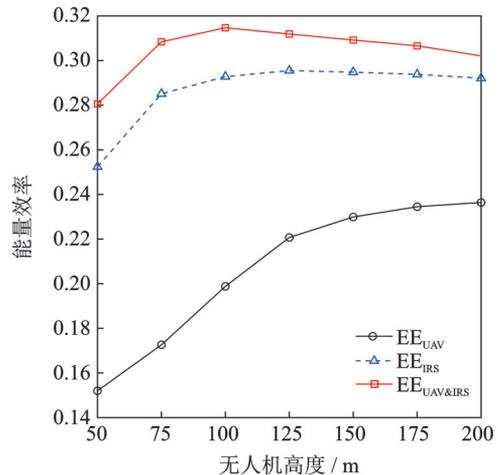
图 3 协同传输场景下能量效率随着无人机高度变化曲线

Fig.3 Energy efficiency curves with attitude of UAV under cooperative transmission scheme

为了对比本文所提的协同传输方法和单一传输方法的性能,本文分别描绘了 3 种传输方式下能量效率随着源节点与无人机地面投影距离以及无人机高度变化的曲线,如图 4 所示。图中  $EE_{UAV}$  为只采用无人机协同中继获得的系统能量效率,  $EE_{IRS}$  为只采用智能反射面反射获得的系统能量效率,而  $EE_{UAV\&IRS}$  为采用无人机协同中继和智能反射面反射两种方式协同传输。在图 4(a)中,将无人机的高度



(a) Energy efficiency curves with distance between source node and horizontal projection of UAV



(b) Energy efficiency curves with attitude of UAV

图 4 不同传输方式下的能量效率对比曲线

Fig.4 Comparison curves of energy efficiency with different transmission methods

固定,不同传输方式下的系统能量效率都随着发射机与无人机地面投影距离的增大而减小,这是因为传输距离变大,传输速率降低,从而能量效率也随之降低。从图4(b)中可以看出,只用IRS和同时采用UAV和IRS两种传输方式下,系统的能量效率先随着无人机高度的增大而增大,然后随着无人机高度的增大而减小。而只采用UAV这种传输方式下,系统的能量效率随着无人机高度的增大。但通过图4(a,b)都可以看出协同传输下的系统能量效率都优于单一传输方式。只采用UAV方式,其功率消耗和处理成本最低,但其系统能量效率最低。而与只采用IRS方式相比,同时采用UAV和IRS方式需要在接收端对两种信号进行合并,增加了信号处理的成本。同时,采用UAV和IRS方式增加了无人机中继转发的功率消耗,但与无人机飞行或者悬停消耗的功率相比,其值相对较小。因此,在把无人机当作智能反射面搭载工具的同时,发挥其作为中继通信节点的作用,有效提升了系统的能量效率。

#### 4 结束语

本文通过智能反射面和无人机的协同传输来提升空地通信网络的能量效率。通过设计无人机的全双工协同中继和智能反射面被动反射的协同传输方案,采用发射机的发射功率和智能反射面反射单元个数的联合优化,运用分层Dinkelbach's算法获得最佳的发射功率和反射单元个数的闭式解,通过仿真发现,两者协同的传输方式比只采用单一协作方式能获得更高的能量效率。后续的研究将对无人机的高度进行优化,进一步提升系统能量效率。

#### 参考文献:

- [1] HASHIDA H, KAWAMOTO Y, KATO N. Intelligent reflecting surface placement optimization in air-ground communication networks toward 6G[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(6): 146-151.
- [2] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [3] WU Qingqing, ZHANG Rui. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106-112.
- [4] YANG Helin, XIONG Zehui, ZHAO Jun, et al. Intelligent reflecting surface assisted anti-jamming communications: A fast reinforcement learning approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2021, 20(3): 1963-1974.
- [5] ZHANG Qianqian, SAAD W, BENNIS M. Reflections in the sky: Millimeter wave communication with UAV-carried intelligent reflectors[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [6] MOHAMED Z, AISSA S. Leveraging UAVs with intelligent reflecting surfaces for energy-efficient communications with cell-edge users[C]//*Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops*. [S.l.]: IEEE, 2020: 1-6.
- [7] ZHANG Qianqian, SAAD W, BENNIS M. Distributional reinforcement learning for mmWave communications with intelligent reflectors on a UAV[C]//*Proceedings of GLOBECOM 2020 IEEE Global Communications Conference*. Taipei, China: IEEE, 2020: 1-6.
- [8] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向6G的无人机通信综述[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(3): 781-789.  
CHEN Xinying, SHENG Min, LI Bo, et al. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 781-789.
- [9] MA Dong, DING Ming, HASSAN M. Enhancing cellular communications for UAVs via intelligent reflective surface[J]. *Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. [S.l.]: IEEE, 2020: 1-6.
- [10] SHAFIQUE T, TABASSUM H, HOSSAIN E. Optimization of wireless relaying with flexible UAV-borne reflecting surfaces [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(1): 309-325.
- [11] AKRAM A, SITHAMPARANATHAN K, SIMON L. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. *IEEE Wireless Communication Letters*, 2014, 3(6): 569-572.
- [12] HORANI A, GOMEZ K. Modeling cellular-to-UAV path-loss for suburban environments[J]. *IEEE Wireless Communication*

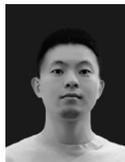
Letters, 2018, 7(1): 82-85.

- [13] ZAPPONE A, JORSWIECK E. Energy efficiency in wireless networks via fractional programming theory[J]. Foundations and Trends in Communications and Information Theory, 2014, 11(3/4): 185-399.
- [14] PROAKIS J, SALEHI M. Digital communications[M]. [S.l.]: McGraw-Hill, 2007.
- [15] SHEN Kaiming, YU Wei. Fractional programming for communication systems—Part I: Power control and beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(10): 2616-2630.
- [16] ZHAO Jinwen, CHEN Ming, CHEN Mingzhe, et al. Energy efficient full-duplex communication systems with reconfigurable intelligent surface[C]//Proceedings of 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall). [S.l.]: IEEE, 2020: 1-5.
- [17] LIU Jingxian, XIONG Ke, LU Yang, et al. Energy efficiency in secure irs-aided swipt[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1884-1888.
- [18] WU Qirui, ZHANG Yirun, HUANG Chongwen, et al. Energy efficient intelligent reflecting surface assisted terahertz communications[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). [S.l.]: IEEE, 2021: 1-6.
- [19] WANG Qianzhu, GAO Zhengnian, XU Yongjun, et al. Energy-efficient optimization for IRS-assisted wireless-powered communication networks[C]//Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference.[S.l.]: IEEE, 2021: 1-5.

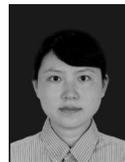
#### 作者简介:



罗屹洁(1981-),女,副教授,研究方向:无人机通信和物理层安全,E-mail:yijieluo@sina.com。



侯志峰(1998-),男,博士研究生,研究方向:智能反射面和无人机通信,E-mail:houzifac@163.com。



杨旻(1983-),通信作者,女,副教授,研究方向:无人机通信和中继通信,E-mail:sheep\_1009@163.com。

(编辑:陈珺)