

IRS辅助的NOMA无人机网络安全速率最大化算法

王正强^{*①} 青思雨^① 万晓榆^① 樊自甫^① 徐勇军^① 多滨^②

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(成都理工大学计算机与网络安全学院 成都 610059)

摘要: 该文研究了智能反射面(IRS)辅助基于非正交多址接入(NOMA)技术的无人机(UAV)网络中的安全传输。为了使系统安全速率最大化, 该文提出联合优化无人机位置、串行干扰消除解码顺序、IRS反射矩阵和UAV发射功率的资源优化问题。由于优化问题是一个混合整数非凸优化问题, 该文提出一种基于块坐标下降的迭代算法, 将原问题分解为3个子问题, 采用基于惩罚、半正定松弛和连续凸逼近的方法求解子问题。仿真表明, 所提算法的系统安全速率优于没有IRS辅助的NOMA方案和没有IRS辅助的正交多址方案。

关键词: 智能反射面; 无人机; 非正交多址接入; 安全速率最大化; 凸优化

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)12-4203-08

DOI: 10.11999/JEIT221189

Secrecy Rate Maximization Algorithm for IRS Assisted NOMA-UAV Networks

WANG Zhengqiang^① QING Siyu^① WAN Xiaoyu^① FAN Zifu^①

XU Yongjun^① DUO Bin^②

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(College of Computer Science and Cyber Security, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In this paper, secure transmission in Intelligent Reflecting Surface (IRS) assisted Unmanned Aerial Vehicle (UAV) networks based on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) is investigated. A joint placement and transmit power of UAV, successive interference cancellation decoding orders, and reflecting matrix of IRS optimization problem is formulated to maximize the secrecy rate. Since the problem is mixed-integer non-convex and challenging to solve, a block coordinate descent based iterative algorithm is developed. The original problem is decomposed into three subproblems, which are solved by exploiting the penalty-based method, the semidefinite relaxation technique, and the successive convex approximation technique. Simulation results demonstrate that the security rate of the proposed scheme is better than the scheme without IRS assisted NOMA network and the scheme without IRS assisted orthogonal multiple access network.

Key words: Intelligent Reflecting Surface (IRS); Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Secrecy rate maximization; Convex optimization

1 引言

随着制造技术的快速发展和成本的不断降低,

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)因其在民用领域的潜在用途而受到极大关注。在面对用户接入数量激增造成的地面基站(Base Station, BS)过载, 或紧急救灾区基站严重不足等问题时, 无人机被认为是解决这一问题的可行前景方案^[1], 将基站搭载到可移动的无人机上协助地面基站通信, 可快速恢复瘫痪的通信服务并有效提高网络覆盖。无人机通信与传统的地面通信相比, 一方面, 空对地信道有很高的概率被视距(Line of Sight, LoS)链路所主导^[2], 这有助于建立高数据速率和可靠的传输。另一方面, 无人机的移动性是可控的, 可以利用它

收稿日期: 2022-09-13; 改回日期: 2022-12-08; 网络出版: 2022-12-23

*通信作者: 王正强 wangzq@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701064, 62271094), 四川省区域创新合作项目(2022YFQ0017), 重庆市博士后研究项目特别资助(2021XM3082)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701064, 62271094), The Sichuan Regional Innovation Cooperation Project (2022YFQ0017), The Special Support for Chongqing Postdoctoral Research Project (2021XM3082)

来提高通信的性能。

对于B5G(Beyond-5G)网络,在UAV通信的应用过程中,安装在UAV上的基站通常需要同时为大量具有严格通信要求的地面用户提供服务^[3]。非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术允许多个用户同时复用同一资源块,可支持大规模用户连接^[4]。NOMA被认为是将UAV整合到B5G网络中的一个有前途的候选方案。

近年来,智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)因其在实现智能可控的无线传播环境中的重要作用而备受关注^[5],将IRS引入到无人机通信系统可以进一步提高通信质量。然而,无线通信的广播特性所带来的安全问题依旧存在,无人机空对地视距信道的优点反而使得无人机发送的信号更容易被地面窃听者所截获^[6]。

NOMA技术通过对功率域的复用来提高频谱效率,增加系统容量。NOMA传输中,用户间的串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)解码顺序由信道条件决定,可以利用UAV的流动性或调整IRS反射矩阵,来改变用户的信道条件。目前已经有很多UAV和IRS的研究,文献^[7-10]考虑的是基于NOMA技术的无人机辅助网络。文献^[11-14]考虑的是基于NOMA技术的IRS辅助网络。文献^[15-17]研究了IRS辅助无人机网络,但文献^[15,16]考虑的是基于时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)协议的网络,且只考虑了单个用户的情况,文献^[17]研究的是基于NOMA的网络最大化和速率问题。然而,当前文献较少研究IRS辅助的NOMA无人机网络的安全问题。

本文主要的研究工作如下:

(1)本文提出了一种IRS辅助的无人机网络的下行NOMA多用户通信场景,在存在单个窃听者的情况下,联合优化UAV的位置、SIC解码顺序、UAV发射功率和IRS反射矩阵来最大化系统安全速率。

(2)本文提出了基于块坐标下降(Block Coordinate Descent, BCD)的迭代算法,将原始优化问题分解为3个子问题进行交替优化求解。针对第1个子问题,即UAV位置和SIC解码顺序的优化问题,采用基于惩罚的方法和连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)方法进行求解。针对第2个子问题,即IRS反射矩阵的优化问题,采用半正定松弛(Semidefinite Relaxation, SDR)和SCA方法进行求解。针对第3个子问题,即UAV发射功率的优化问题,采用SCA方法进行求解。

(3)仿真结果表明,相比于基准方案,本文所提的IRS辅助NOMA无人机方案能提高系统安全速率。

2 系统模型

本文考虑一种IRS辅助的无人机网络的下行NOMA通信场景。系统模型如图1所示,假设系统中UAV作为BS,在固定高度 H 飞行,IRS被部署在建筑物上,由 N 个反射元件组成,地面有 K 个用户(User)和一个窃听者,UAV、用户和窃听者都配备了单根天线。建立3维笛卡儿坐标系,UAV的坐标为 $\mathbf{q} = (x, y, H)$,IRS的坐标为 $\mathbf{r} = (x_r, y_r, z_r)$,用户 U_k 的坐标 $\mathbf{w}_{u,k} = (x_k, y_k, 0)$,窃听者 U_e 的坐标 $\mathbf{w}_e = (x_e, y_e, 0)$ 。UAV与 U_k 之间的信道为 $h_{ak} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$,UAV与 U_e 之间的信道是 $h_{ae} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$,UAV与IRS之间的信道为 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$,IRS与 U_k 之间的信道为 $\mathbf{g}_{rk} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$,IRS与 U_e 之间的信道为 $\mathbf{g}_{re} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$,IRS的反射矩阵为 $\Theta = \text{diag}\{e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}\} \in \mathbb{C}^{N \times N}$,其中 $\theta_n \in [0, 2\pi), n = 1, 2, \dots, N$ 。

假设信道 h_{ak} , h_{ae} , \mathbf{g}_{rk} 以及 \mathbf{g}_{re} 遵循莱斯信道模型,表示为^[18]

$$h_{ak} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,k}\|^{\beta_0}}} \left(\sqrt{\frac{R}{R+1}} \bar{h}_{ak} + \sqrt{\frac{1}{R+1}} \tilde{h}_{ak} \right) \quad (1a)$$

$$h_{ae} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_e\|^{\beta_0}}} \left(\sqrt{\frac{R}{R+1}} \bar{h}_{ae} + \sqrt{\frac{1}{R+1}} \tilde{h}_{ae} \right) \quad (1b)$$

$$\mathbf{g}_{rk} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\|\mathbf{r} - \mathbf{w}_{u,k}\|^{\beta_0}}} \left(\sqrt{\frac{R}{R+1}} \bar{\mathbf{g}}_{rk} + \sqrt{\frac{1}{R+1}} \tilde{\mathbf{g}}_{rk} \right) \quad (1c)$$

$$\mathbf{g}_{re} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\|\mathbf{r} - \mathbf{w}_e\|^{\beta_0}}} \left(\sqrt{\frac{R}{R+1}} \bar{\mathbf{g}}_{re} + \sqrt{\frac{1}{R+1}} \tilde{\mathbf{g}}_{re} \right) \quad (1d)$$

其中, ρ_0 表示参考距离1 m处的路径损耗, β_0 表示路径衰落指数, R 表示莱斯因子, \bar{h}_{ak} , \bar{h}_{ae} , $\bar{\mathbf{g}}_{rk}$, $\bar{\mathbf{g}}_{re}$ 表示LoS分量, \tilde{h}_{ak} , \tilde{h}_{ae} , $\tilde{\mathbf{g}}_{rk}$, $\tilde{\mathbf{g}}_{re}$ 表示非视

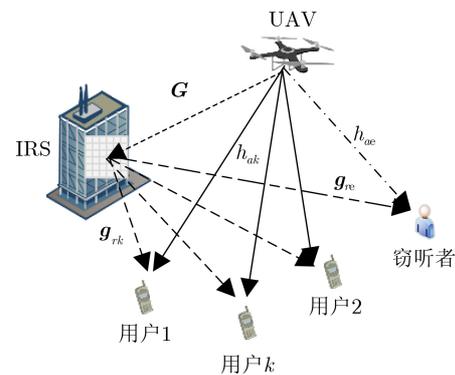


图1 系统模型

距(Non Line of Sight, NLoS)分量。对于IRS考虑用均匀线阵模型, $\bar{\mathbf{g}}_{rk}$ 和 $\bar{\mathbf{g}}_{re}$ 分别为^[17]

$$\bar{\mathbf{g}}_{rk} = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d \cos \phi_k}, \dots, e^{-j\frac{2\pi(N-1)}{\lambda}d \cos \phi_k} \right]^T \quad (1e)$$

$$\bar{\mathbf{g}}_{re} = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d \cos \phi_e}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(N-1)d \cos \phi_e} \right]^T \quad (1f)$$

其中, λ 为载波波长, d 为IRS单元间距, $\cos \phi_k = \frac{x_k - x_r}{\|\mathbf{w}_{u,k} - \mathbf{r}\|}$, $\cos \phi_e = \frac{x_e - x_r}{\|\mathbf{w}_e - \mathbf{r}\|}$ 。由于IRS布置在建筑物上, 具有一定高度, 对UAV-IRS信道, 只考虑LoS信道^[17], \mathbf{G} 可表示为 $\mathbf{G} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|^2}} \bar{\mathbf{G}}$, $\bar{\mathbf{G}} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|^2}} \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d \cos \varphi}, \dots, e^{-j\frac{2\pi(N-1)}{\lambda}d \cos \varphi} \right]^T$, 其中 $\cos \varphi = \frac{x_r - x}{\|\mathbf{r} - \mathbf{q}\|}$ 。

根据NOMA协议, 用户采用SIC技术来消除干扰。引入变量 $\alpha_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i \neq j$, 当 $\alpha_{i,j} = 1$, 表示用户 U_i 解码用户 U_j 。令 $c_k = |h_{ak} + \mathbf{g}_{rk}^H \Theta \mathbf{G}|^2$, $\alpha_{i,j}$ 定义为

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} 1, & c_i \geq c_j \\ 0, & c_i < c_j \end{cases} \quad (2a)$$

$$\alpha_{i,j} + \alpha_{j,i} = 1 \quad (2b)$$

$$\alpha_{i,j} \alpha_{j,k} \leq \alpha_{i,k} \quad (2c)$$

如文献^[17]将关于 $\alpha_{i,j}$ 定义的式(2a)近似为式(3)

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} 1, & \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,i}\| \leq \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,j}\| \\ 0, & \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,i}\| > \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,j}\| \end{cases} \quad (3)$$

由文献^[18]中定理1, UAV与用户 U_k 之间以及与窃听者 U_e 之间的期望信道增益分别为

$$\mathbb{E}[c_k] \triangleq \eta_k = \left| \hat{h}_{ak} + \hat{\mathbf{g}}_{rk}^H \Theta \mathbf{G} \right|^2 + \frac{\rho_0 - Z}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,k}\|^{\beta_0}} + \frac{t_k}{\|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|^2} \quad (4a)$$

$$\mathbb{E}[c_e] \triangleq \eta_e = \left| \hat{h}_{ae} + \hat{\mathbf{g}}_{re}^H \Theta \mathbf{G} \right|^2 + \frac{\rho_0 - Z}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_e\|^{\beta_0}} + \frac{t_e}{\|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|^2} \quad (4b)$$

其中, $\hat{h}_{ak} = \sqrt{\frac{Z}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,k}\|^{\beta_0}}} \bar{h}_{ak}$, $\hat{\mathbf{g}}_{rk}^H = \sqrt{\frac{Z}{\|\mathbf{r} - \mathbf{w}_{u,k}\|^{\beta_0}}} \bar{\mathbf{g}}_{rk}^H$, $\bar{\mathbf{g}}_{rk}$, $t_k = \frac{N\rho_0(\rho_0 - Z)}{\|\mathbf{r} - \mathbf{w}_{u,k}\|^{\beta_0}}$, $Z = \frac{R\rho_0}{R+1}$, $c_e = |h_{ae} + \mathbf{g}_{re}^H \Theta \mathbf{G}|^2$, $\hat{h}_{ae} = \sqrt{\frac{Z}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_e\|^{\beta_0}}} \bar{h}_{ae}$, $\hat{\mathbf{g}}_{re}^H = \sqrt{\frac{Z}{\|\mathbf{r} - \mathbf{w}_e\|^{\beta_0}}} \bar{\mathbf{g}}_{re}^H$, $t_e = \frac{N\rho_0(\rho_0 - Z)}{\|\mathbf{r} - \mathbf{w}_e\|^{\beta_0}}$ 。

UAV发送给地面用户的信号为 $\sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} s_k$, 其中 p_k 是UAV分配给用户 U_k 的发射功率, s_k 是UAV发送给用户 U_k 的信号, 满足 $\mathbb{E}\{|s_k|^2\} = 1$,

用户 U_k 和窃听者 U_e 接收到的信号分别表示为 $y_k = (h_{ak} + \mathbf{g}_{rk}^H \Theta \mathbf{G}) \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} s_k + n_k$, $y_e = (h_{ae} + \mathbf{g}_{re}^H \Theta \mathbf{G}) \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} s_k + n_e$, 其中 n_k 和 n_e 表示均值为0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

用户 U_k 的速率为

$$R_{u,k} = \log_2 \left(1 + \frac{\eta_k p_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \alpha_{i,k} \eta_k p_i + \sigma^2} \right),$$

窃听者 U_e 窃听用户 U_k 的速率为

$$R_{e,k} = \log_2 \left(1 + \frac{\eta_e p_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \eta_e p_i + \sigma^2} \right),$$

安全速率为 $R_{s,k} = [R_{u,k} - R_{e,k}]^+$ 。

以最大化系统安全速率为目标, 系统的资源优化问题可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \max_{q, A, \Theta, P} R_s &= \sum_{k=1}^K (R_{u,k} - R_{e,k}) \\ \text{s.t. C1a: } &\theta_n \in [0, 2\pi], \forall n \\ \text{C1b: } &p_i \geq 0, \forall i \\ \text{C1c: } &\sum_{i=1}^K p_i \leq P_{\max} \\ &\text{式(2b), 式(2c), 式(3)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{P} = \{p_i, \forall i\}$, $\mathbf{A} = \{\alpha_{i,j}, \forall i \neq j\}$, 目标函数将 $[\cdot]^+$ 省略的原因是, $R_{s,k}$ 至少为0。式(5)是一个混合整数非凸优化问题, 考虑对式(5)基于BCD方法进行迭代求解。

3 算法优化

基于BCD, 将式(5)分为3个子问题, 即UAV位置和SIC解码顺序优化、IRS反射矩阵优化、UAV发射功率优化。

3.1 UAV位置和SIC解码顺序优化

对于给定的IRS反射矩阵 Θ 和UAV发射功率 \mathbf{P} , 联合优化UAV的位置 \mathbf{q} 和SIC解码顺序 \mathbf{A} , 优化问题如式(6)所示。

$$\max_{q, A} R_s, \text{ s.t. 式(2b), 式(2c), 式(3)} \quad (6)$$

式(6)仍是一个混合整数非凸优化问题。

令 u_k 为UAV与用户 U_k 距离的上界, l_e 为UAV与窃听者 U_e 距离的下界, u_r 表示UAV与IRS距离的上界, l_r 表示UAV与IRS距离的下界, 满足这些约束: $u_k \geq \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,k}\|$, $\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_e\| \geq l_e$, $u_r \geq \|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|$, $\|\mathbf{q} - \mathbf{r}\| \geq l_r$ 。

将 η_k 的下限表示为 $\underline{\eta}_k = \rho_0(u_k)^{-\beta_0} + A_k(u_r)^{-2} + B_k(u_k)^{-\beta_0/2}(u_r)^{-1}$, η_e 的上限表示为 $\bar{\eta}_e = \rho_0(l_e)^{-\beta_0} +$

$C_e(l_r)^{-2} + D_e(l_e)^{-\beta_0/2}(l_r)^{-1}$, 其中 $A_k = \rho_0 |\hat{g}_{rk}^H \Theta \bar{G}|^2 + t_k$, $B_k = 2\text{Re} \{ \sqrt{Z\rho_0} \hat{g}_{rk}^H \Theta \bar{G} \}$, $C_e = \rho_0 |\hat{g}_{re}^H \Theta \bar{G}|^2 + t_e$, $D_e = 2\text{Re} \{ \sqrt{Z\rho_0} \hat{g}_{re}^H \Theta \bar{G} \}$.

引入辅助变量 W_k 和 $W_{e,k}$, 其中 $W_k = \sum_{i=1, i \neq k}^K \alpha_{i,k} p_i + \frac{\sigma^2}{\eta_k}$, $W_{e,k} = \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i + \frac{\sigma^2}{\bar{\eta}_e}$. 由此可得, $R_s \geq \sum_{k=1}^K \left[\log_2 \left(1 + \frac{p_k}{W_k} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{p_k}{W_{e,k}} \right) \right]$.

将式(3)转化为约束

$$\alpha_{i,j} - (\alpha_{i,j})^2 \leq 0, \quad \forall i \neq j \quad (7a)$$

$$0 \leq \alpha_{i,j} \leq 1, \quad \forall i \neq j \quad (7b)$$

约束式(7a)和式(7b)共同保证 $\alpha_{i,j}$ 为0或1.

式(7a)不是且无法转换为凸集, 式(7a)作为惩罚项写入式(6)的目标函数, 重写为式(8).

$$\max_{q, A, \chi} \sum_{k=1}^K \left[\log_2 \left(1 + \frac{p_k}{W_k} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{p_k}{W_{e,k}} \right) \right] + \xi \sum_{j=1}^K \sum_{i \neq j}^K (\alpha_{i,j} - (\alpha_{i,j})^2)$$

$$\text{s.t. C2a: } W_k \geq \sum_{i=1, i \neq k}^K \alpha_{i,k} p_i + \frac{\sigma^2}{\eta_k}$$

$$\text{C2b: } W_{e,k} \leq \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i + \frac{\sigma^2}{\bar{\eta}_e}$$

$$\text{C2c: } \eta_k \leq \rho_0 (u_k)^{-\beta_0} + A_k (u_r)^{-2} + B_k (u_k)^{-\beta_0/2} (u_r)^{-1}$$

$$\text{C2d: } \bar{\eta}_e \geq \rho_0 (l_e)^{-\beta_0} + C_e (l_r)^{-2} + D_e (l_e)^{-\beta_0/2} (l_r)^{-1}$$

$$\text{C2e: } u_k \geq \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,k}\|$$

$$\text{C2f: } \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_e\| \geq l_e$$

$$\text{C2g: } u_r \geq \|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|$$

$$\text{C2h: } \|\mathbf{q} - \mathbf{r}\| \geq l_r$$

$$\text{式(2b), 式(2c), 式(7b)} \quad (8)$$

其中, $\chi = \{W_k, W_{e,k}, \eta_k, \bar{\eta}_e, u_k, l_e, u_r, l_r\}$ 为辅助变量的集合, $\xi \gg 0$ 是惩罚系数, $\alpha_{i,j} - (\alpha_{i,j})^2$ 的值的范围是 $[0, 1/4]$, 当 $\xi \rightarrow \infty$ 时, $\xi \sum_{j=1}^K \sum_{i=1, i \neq j}^K (\alpha_{i,j} - (\alpha_{i,j})^2)$ 趋近于0, 此时式(6)和式(8)是等价的^[17]. 但式(8)仍是个非凸优化问题. 下面采用SCA方法来求解式(8).

式(8)目标函数中 $\log_2 \left(1 + \frac{p_k}{W_k} \right)$ 在 $W_k^{(n)}$ 1阶泰勒展开得到全局下界

$$\log_2 \left(1 + \frac{p_k}{W_k} \right) \geq \log_2 \left(1 + \frac{p_k}{W_k^{(n)}} \right) - \frac{p_k \log_2 e}{W_k^{(n)} (W_k^{(n)} + p_k)} (W_k - W_k^{(n)}) \triangleq R(W_k) \quad (9)$$

对于非凸约束C2b, 在 $\bar{\eta}_e^{(n)}$ 处1阶泰勒展开

$$W_{e,k} \leq \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i + \frac{2\sigma^2}{\bar{\eta}_e^{(n)}} - \frac{\sigma^2}{(\bar{\eta}_e^{(n)})^2} \bar{\eta}_e \quad (10)$$

对于约束C2c和C2d中 \bar{G} 取决于UAV的位置 \mathbf{q} , 使得约束C2c和C2d的右边难以处理, 为了克服这一障碍, 引入约束: $\|\mathbf{q} - \mathbf{q}^{(n)}\| \leq \delta$, 其中 $\mathbf{q}^{(n)}$ 表示SCA第 n 次迭代的结果, δ 为每次SCA迭代的UAV最大允许位移.

令 $f_k(u_k, u_r) = \rho_0 u_k^{-\beta_0} + A_k u_r^{-2}$, $g_k(u_k, u_r) = u_k^{-\beta_0/2} u_r^{-1}$, 则约束C2c的右边为 $f_k + B_k g_k$. 根据幂函数定理^[19], f_k 为凸函数, 由于 g_k 的Hesse矩阵正定, 所以 g_k 为凸函数^[19]. $f_k + B_k g_k$ 在 $\{u_k^{(n)}, u_r^{(n)}\}$ 处1阶泰勒展开, 得到 $[f_k + B_k g_k]^{lb} = \begin{cases} [f_k]^{lb} + |B_k| [g_k]^{lb}, & B_k \geq 0 \\ [f_k]^{lb} - |B_k| [g_k]^{lb}, & \text{其他} \end{cases}$, 其中 $[f_k]^{lb}$ 和 $[g_k]^{lb}$ 分别为 f_k 和 g_k 的下界. 同理, 令 $f_e = \rho_0 l_e^{-\beta_0} + C_e l_r^{-2}$, $g_e = l_e^{-\beta_0/2} l_r^{-1}$, 则约束C2d的右边为 $f_e + D_e g_e$. $f_e + D_e g_e$ 在 $\{l_e^{(n)}, l_r^{(n)}\}$ 处1阶泰勒展开, 得到 $[f_e + D_e g_e]^{ub} = \begin{cases} f_e + |D_e| g_e, & D_e \geq 0 \\ f_e - |D_e| g_e, & \text{其他} \end{cases}$, 其中 $[g_e]^{ub}$ 为 g_e 的上界. 利用SCA, 将非凸约束C2f, C2h, 式(2c)转换为凸集.

式(8)可以通过求解下界逼近问题式(11)

$$\left. \begin{aligned} & \max_{q, A, \chi} \sum_{k=1}^K \left[R(W_k) - \log_2 \left(1 + \frac{p_k}{W_{e,k}} \right) \right] \\ & + \xi \sum_{j=1}^K \sum_{i \neq j}^K (\alpha_{i,j} - (\alpha_{i,j})^2) \\ \text{s.t. C3a: } & \|\mathbf{q} - \mathbf{q}^{(n)}\| \leq \varepsilon \\ \text{C3b: } & \eta \leq \left[\tilde{f}_k + B_k \tilde{g}_k \right]^{lb} \\ \text{C3c: } & \bar{\eta}_e \geq \left[\tilde{f}_e + D_e \tilde{g}_e \right]^{ub} \\ \text{C3d: } & \|q^{(n)} - w_e\| + q - q^{(n)} \geq l_e \\ \text{C3e: } & \|q^{(n)} - r\| + q - q^{(n)} \geq l_r \\ \text{C3f: } & \frac{(\alpha_{i,j} + \alpha_{j,k})^2}{4} \\ & + \frac{(\alpha_{i,j}^{(n)} - \alpha_{j,k}^{(n)})^2 - 2(\alpha_{i,j}^{(n)} - \alpha_{j,k}^{(n)})(\alpha_{i,j} - \alpha_{j,k})}{4} \\ & \leq \alpha_{i,k}, \forall i \neq j \neq k \\ & \text{C2a, C2e, C2g, C2i, 式(2b), 式(10)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)是一个凸优化问题, 其最优解可以由凸优化内点算法求解。对于解码顺序 \mathbf{A} 的求解, 进行 $\alpha_{i,j} = \text{round}(\alpha_{i,j})$ 操作, round 函数定义为取最近整数, 使解满足0, 1约束。

3.2 IRS反射矩阵优化

对于给定的UAV位置 \mathbf{q} 、SIC解码顺序 \mathbf{A} 和 UAV发射功率 \mathbf{P} , 优化IRS反射矩阵 Θ , 优化问题如式(12)所示。

$$\max_{\Theta} R_s, \text{ s.t. C1a} \quad (12)$$

由于非凸目标函数和非凸约束, 式(12)是非凸优化问题。

首先重写 η_k , 将式(4a)重写为 $\eta_k = |\mathbf{h}_k^H \mathbf{v}|^2 + \frac{\rho_0 - Z}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,k}\|^{\beta_0}} + \frac{t_k}{\|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|^2} = \text{Tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{V}) + m_k$, 其中 $\mathbf{H}_k = \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H$, $\mathbf{h}_k^H = [\mathbf{b}_k^H \hat{h}_{ak}]$, $\mathbf{b}_k^H = \hat{\mathbf{g}}_k^H \text{diag}(\mathbf{G}) \in \mathbb{C}^{1 \times N}$, $\mathbf{V} = \mathbf{v} \mathbf{v}^H$, $\theta = [e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}]^T$, $\mathbf{v} = [\theta^T \ 1]^T$, $m_k = \frac{\rho_0 - Z}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_{u,k}\|^{\beta_0}} + \frac{t_k}{\|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|^2}$ 。同理, 再重写 η_e , 将式(4b)重写为 $\eta_e = |\mathbf{h}_e^H \mathbf{v}|^2 + \frac{\rho_0 - Z}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_e\|^{\beta_0}} + \frac{t_e}{\|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|^2} = \text{Tr}(\mathbf{H}_e \mathbf{V}) + m_e$, 其中 $\mathbf{H}_e = \mathbf{h}_e \mathbf{h}_e^H$, $\mathbf{h}_e^H = [\mathbf{b}_e^H \hat{h}_{ae}]$, $\mathbf{b}_e^H = \hat{\mathbf{g}}_e^H \text{diag}(\mathbf{G}) \in \mathbb{C}^{1 \times N}$, $m_e = \frac{\rho_0 - Z}{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_e\|^{\beta_0}} + \frac{t_e}{\|\mathbf{q} - \mathbf{r}\|^2}$ 。

将用户 U_k 安全速率 $R_{s,k}$ 重写为

$$\begin{aligned} R_{s,k} = & \log_2 \left((\text{Tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{V}) + m_k) \sum_{i=1}^K \alpha_{i,k} p_i + \sigma^2 \right) \\ & - \log_2 \left((\text{Tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{V}) + m_k) \sum_{i=1, i \neq k}^K \alpha_{i,k} p_i + \sigma^2 \right) \\ & - \log_2 \left((\text{Tr}(\mathbf{H}_e \mathbf{V}) + m_e) \sum_{i=1}^K p_i + \sigma^2 \right) \\ & + \log_2 \left((\text{Tr}(\mathbf{H}_e \mathbf{V}) + m_e) \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i + \sigma^2 \right) \end{aligned} \quad (13)$$

将式(13)等号右边各项分别表示为 \hat{f}_k , \hat{g}_k , \hat{f}_e , \hat{g}_e , 将式(12)重写为式(14)

$$\left. \begin{aligned} \max_{\mathbf{V}} R_s = & \sum_{k=1}^K (\hat{f}_k - \hat{g}_k - \hat{f}_e + \hat{g}_e) \\ \text{s.t. C4a: } & [\mathbf{V}]_{nn} = 1, n = 1, 2, \dots, N+1 \\ \text{C4b: } & \mathbf{V} \succeq 0, \mathbf{V} \in \mathbb{H}^{N+1} \\ \text{C4c: } & \text{rank}(\mathbf{V}) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由于约束C4c为非凸约束, 采用SDR方法, 忽略约束C4c, 式(14)可以通过求解下界逼近问题式(15)

$$\max_{\mathbf{V}} R_s = \sum_{k=1}^K (\hat{f}_k - [\hat{g}_k]^{ub} - [\hat{f}_e]^{ub} + \hat{g}_e), \text{ s.t. C4a, C4b} \quad (15)$$

其中, $[\hat{g}_k]^{ub}$ 和 $[\hat{f}_e]^{ub}$ 分别为在SCA第 n 次迭代后的点 $\mathbf{V}^{(n)}$ 处, 对 \hat{g}_k 和 \hat{f}_e 进行1阶泰勒展开得到的上界, 式(15)是一个凸优化问题, 但式(15)的最优解 \mathbf{V}^* 可能不满足秩为1, 需要从式(15)的解来构造秩为1的解。参考文献[20], 将 \mathbf{V}^* 进行特征值分解, 得到 $\mathbf{V}^* = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{U}^H$, 其中 $\mathbf{U} = [e_1, e_2, \dots, e_{N+1}]$, $\Sigma = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N+1}\}$ 分别是酉矩阵和对角矩阵。令 $\mathbf{v}^* = \mathbf{U} \Sigma^{1/2} \mathbf{x}$, 其中 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{(N+1) \times 1}$ 是根据 $\mathbf{x} \in CN(0, \mathbf{I}_{N+1})$ 生成的随机向量, 则式(14)的解为 $\mathbf{V} = \mathbf{v} \mathbf{v}^H$, 其中 $\mathbf{v} = e^{j \arg([\mathbf{v}^*]_{N+1})}$, 从而得到 $\theta^T = [\mathbf{v}]_{(1:N)}$, $[\mathbf{v}]_{(1:N)}$ 表示包含 \mathbf{v} 中前 N 个元素的向量。

3.3 UAV发射功率优化

对于给定UAV位置 \mathbf{q} 、SIC解码顺序 \mathbf{A} 和IRS反射矩阵 Θ , 优化UAV发射功率 \mathbf{P} , 优化问题如式(16)所示。

$$\max_{\mathbf{P}} R_s, \text{ s.t. C1b, C1c} \quad (16)$$

将用户 U_k 安全速率 $R_{s,k}$ 重写为

$$\begin{aligned} R_{s,k} = & \log_2 \left(\eta_k \sum_{i=1}^K \alpha_{i,k} p_i + \sigma^2 \right) \\ & - \log_2 \left(\eta_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \alpha_{i,k} p_i + \sigma^2 \right) \\ & - \log_2 \left(\eta_e \sum_{i=1}^K p_i + \sigma^2 \right) \\ & + \log_2 \left(\eta_e \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i + \sigma^2 \right) \end{aligned} \quad (17)$$

将式(17)等号右边各项分别表示为 \bar{f}_k , \bar{g}_k , $\bar{f}_{e,k}$, $\bar{g}_{e,k}$, 式(17)可重写为 $R_{s,k} = \bar{f}_k - \bar{g}_k - \bar{f}_{e,k} + \bar{g}_{e,k}$, 式(16)可以通过求解下界逼近问题式(18)

$$\max_{\mathbf{P}} \sum_{k=1}^K (\bar{f}_k - [\bar{g}_k]^{ub} - [\bar{f}_{e,k}]^{ub} + \bar{g}_{e,k}), \text{ s.t. C1b, C1c} \quad (18)$$

其中, $[\bar{g}_k]^{ub}$ 和 $[\bar{f}_{e,k}]^{ub}$ 分别为在点 $\mathbf{P}^{(n)}$ 处, 对 \bar{g}_k 和 \bar{f}_e 进行1阶泰勒展开得到的上界, 式(18)是一个凸优化问题, 其最优解可以用凸优化内点算法求解。

综上, 给出解决式(5)的基于BCD的安全速率最大化算法如算法1所示。

假设算法1的迭代次数是 M , 由文献[21]所得算法1复杂度为 $O\left(M(K^{8.5} + N^{3.5}) \log_2\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)\right)$ 。

算法1 基于BCD的安全速率最大化算法

初始化: $N, K, \{\mathbf{q}^{(0)}, \mathbf{A}^{(0)}, \Theta^{(0)}, \mathbf{P}^{(0)}\}$, 迭代次数 $n=0$, 容忍误差 ε , 最大迭代次数 n_{\max}

REPEAT

给定 $\Theta^{(n)}$ 和 $\mathbf{P}^{(n)}$ 时, 基于凸优化求解问题式(11)计算UAV位置和SIC解码顺序 $\mathbf{q}^{(n+1)}$ 和 $\mathbf{A}^{(n+1)}$

给定 $\mathbf{q}^{(n+1)}$ 、 $\mathbf{A}^{(n+1)}$ 和 $\mathbf{P}^{(n)}$ 时, 基于凸优化求解问题式(15)计算IRS反射矩阵 $\Theta^{(n+1)}$

给定 $\mathbf{q}^{(n+1)}$ 、 $\mathbf{A}^{(n+1)}$ 和 $\Theta^{(n+1)}$ 时, 基于凸优化求解问题式(18)计算UAV发射功率 $\mathbf{P}^{(n+1)}$

更新 $R_s^{(n+1)}$, $n=n+1$

UNTIL $\text{abs}(R_s^{(n)} - R_s^{(n-1)}) \leq \varepsilon$ 或 $n > n_{\max}$

输出: UAV位置 $\mathbf{q}^{(n)}$, SIC解码顺序 $\mathbf{A}^{(n)}$, IRS反射矩阵 $\Theta^{(n)}$ 和 UAV发射功率 $\mathbf{P}^{(n)}$

4 仿真结果

考虑用户数 $K = 7$, 仿真参数设置如下: 参考距离 1 m 处的路径损耗为 $\rho_0 = -30$ dB, 路径衰落指数为 $\beta_0 = 2$, 莱斯因子为 $R = 10$ dB, UAV 的高度 $H = 100$ m, UAV 最大允许优化位移 $\delta = 5$ m, 根据 UAV 到用户的距离初始化 SIC 解码顺序 \mathbf{A} , UAV 的发送功率由最大发射功率初始化, 平均分配给各用户, IRS 的相移在 $[0, 2\pi)$ 内随机均匀生成。

算法1在不同IRS反射元件数 N 和 UAV 最大发射功率 P_{\max} 情况下的收敛情况如图2所示。本文提出的基于BCD的优化算法随着迭代次数的增加而

收敛, 当 $P_{\max} = 30$ dBm 时, IRS 反射元件数 $N = 240$ 比 $N = 80$ 情况下的系统安全速率提高了 1.55%, 当 IRS 反射元件数 $N = 240$ 时, UAV 最大发射功率 $P_{\max} = 35$ dBm 比 $P_{\max} = 30$ dBm 情况下的系统安全速率提高了 10.3%。

从图3(a)可以看出, 在 UAV 最大发射功率 30 dBm 的情况下, 算法1所得到的系统安全速率随着 IRS 反射元件数的增加而增大。相比该系统没有 IRS 的情况, IRS 反射元件数为 80 时, 系统安全速率提高 5.1%。相比系统使用 OMA 协议且没有放置 IRS 的情况, 使用 NOMA 协议但没有放置 IRS 的系统安全速率提高了 11 倍。

从图3(b)可以看出, 在 IRS 反射元件数 $N = 80$ 的情况下, 算法1所得到的系统安全速率随着 UAV 最大发射功率的增加而增大。相比该系统没有 IRS 的情况, $P_{\max} = 30$ dBm 时, 系统安全速率提高 5.1%, 相比系统使用 OMA 协议且没有放置 IRS 的情况, $P_{\max} = 30$ dBm 时, 使用 NOMA 协议但没有放置 IRS 的系统安全速率提高了 11 倍。

将用户位置随机均匀分布在半径为 10 m 的圆形区域内, 在 IRS 反射元件数为 80, UAV 最大发射功率为 30 dBm 的情况下, 安全速率随用户个数的

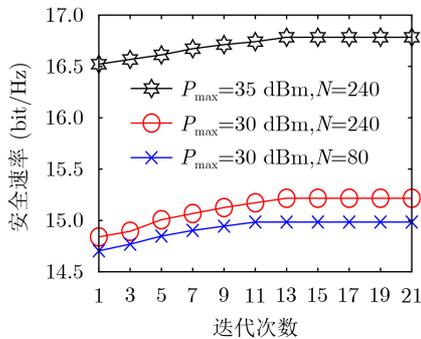
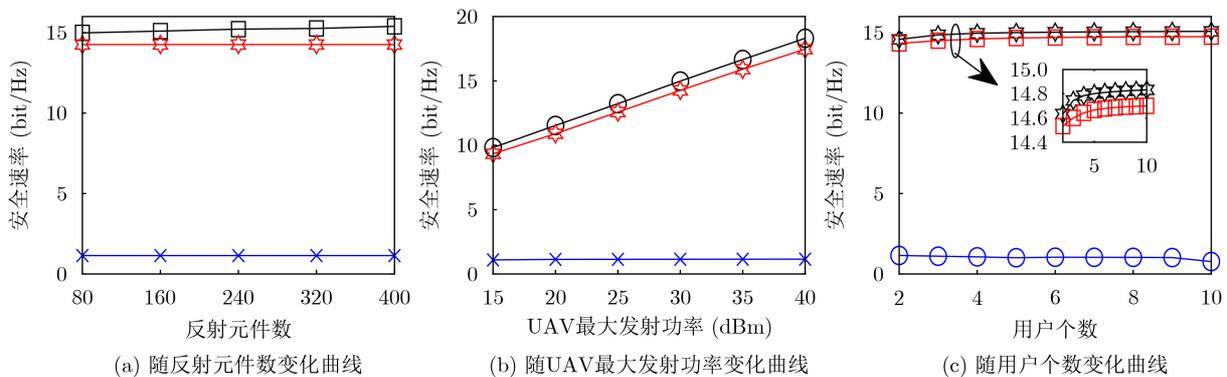


图2 安全速率随迭代次数变化曲线



—■— 本文算法 —☆— NOMA 无 IRS —×— OMA 无 IRS

图3 安全速率变化曲线

变化曲线如图3(c)所示。用户个数越多,系统安全速率越大。在不同用户个数下,本文提出的方案都优于基准方案。

5 结论

本文研究了IRS辅助的NOMA无人机网络的安全速率,提出一种联合UAV位置、SIC解码顺序、IRS反射矩阵和UAV反射功率的优化算法来实现系统安全速率最大化。首先,分析了IRS辅助的NOMA无人机网络模型;其次,构建安全速率优化问题;然后,采用惩罚函数、SDR、SCA等方法对优化问题进行处理并求解;最后,通过与其他方案对比,利用仿真,验证了本文所提算法的有效性。在下一步的研究工作中可以考虑多无人机协同或多个IRS协作来提高系统安全性能,还可以考虑实际应用中会遇到的一些问题,如相位误差^[22]和反射单元数目配置^[23]等。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Xing, ZHANG Yan, YU Rong, *et al.* Enhancing spectral-energy efficiency for LTE-advanced heterogeneous networks: A users social pattern perspective[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(2): 10–17. doi: [10.1109/MWC.2014.6812286](https://doi.org/10.1109/MWC.2014.6812286).
- [2] MATOLAK D W and SUN Ruoyu. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—part III: The suburban and near-urban environments[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(8): 6607–6618. doi: [10.1109/TVT.2017.2659651](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2659651).
- [3] OUBBATI O S, ATIQUZZAMAN M, AHANGER T A, *et al.* Softwarization of UAV networks: A survey of applications and future trends[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 98073–98125. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2994494](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994494).
- [4] MARAQA O, RAJASEKARAN A S, AL-AHMADI S, *et al.* A survey of rate-optimal power domain NOMA with enabling technologies of future wireless networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2192–2235. doi: [10.1109/COMST.2020.3013514](https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3013514).
- [5] WU Qingqing and ZHANG Rui. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106–112. doi: [10.1109/MCOM.001.1900107](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900107).
- [6] WU Huici, LI Hanjie, WEI Zhiqing, *et al.* Secrecy performance analysis of air-to-ground communication with UAV jitter and multiple random walking eavesdroppers[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 572–584. doi: [10.1109/TVT.2020.3047082](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3047082).
- [7] WU Xuemeng, WEI Zaixue, CHENG Zhenqiao, *et al.* Joint optimization of UAV trajectory and user scheduling based on NOMA technology[C]. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Seoul, Korea (South), 2020: 1–6. doi: [10.1109/WCNC45663.2020.9120737](https://doi.org/10.1109/WCNC45663.2020.9120737).
- [8] PANG Xiaowei, LI Zan, CHEN Xiaoming, *et al.* UAV-aided NOMA networks with optimization of trajectory and precoding[C]. 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Hangzhou, China, 2018: 1–6. doi: [10.1109/WCSP.2018.8555640](https://doi.org/10.1109/WCSP.2018.8555640).
- [9] DUO Bin, LUO Junsong, LI Yilian, *et al.* Joint trajectory and power optimization for securing UAV communications against active eavesdropping[J]. *China Communications*, 2021, 18(1): 88–99. doi: [10.23919/JCC.2021.01.008](https://doi.org/10.23919/JCC.2021.01.008).
- [10] GAO Ying, TANG Hongying, LI Baoqing, *et al.* Joint trajectory and power design for UAV-enabled secure communications with No-Fly zone constraints[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 44459–44470. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2908407](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908407).
- [11] MU Xidong, LIU Yuanwei, GUO Li, *et al.* Exploiting intelligent reflecting surfaces in NOMA networks: Joint beamforming optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(10): 6884–6898. doi: [10.1109/TWC.2020.3006915](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3006915).
- [12] ZUO Jiakuo, LIU Yuanwei, BASAR E, *et al.* Intelligent reflecting surface enhanced millimeter-wave NOMA systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(11): 2632–2636. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3009158](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3009158).
- [13] GUAN Xinrong, WU Qingqing, and ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface assisted secrecy communication: Is artificial noise helpful or not?[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 778–782. doi: [10.1109/LWC.2020.2969629](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2969629).
- [14] CUI Miao, ZHANG Guangchi, and ZHANG Rui. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(5): 1410–1414. doi: [10.1109/LWC.2019.2919685](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2919685).
- [15] 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).
- [16] LI Sixian, DUO Bin, DI RENZO M, *et al.* Robust secure UAV communications with the aid of reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(10): 6402–6417. doi: [10.1109/TWC.2021.3073746](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3073746).
- [17] MU Xidong, LIU Yuanwei, GUO Li, *et al.* Intelligent reflecting surface enhanced multi-UAV NOMA networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021,

- 39(10): 3051–3066. doi: [10.1109/JSAC.2021.3088679](https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3088679).
- [18] HUA Meng, YANG Luxi, WU Qingqing, *et al.* 3D UAV trajectory and communication design for simultaneous uplink and downlink transmission[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9): 5908–5923. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3003662](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3003662).
- [19] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 67–89.
- [20] LI Zhendong, CHEN Wen, WU Qingqing, *et al.* Joint beamforming design and power splitting optimization in IRS-assisted SWIPT NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(3): 2019–2033. doi: [10.1109/TWC.2021.3108901](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3108901).
- [21] MAO Sun, LENG Supeng, HU Jie, *et al.* Power minimization resource allocation for underlay MISO-NOMA SWIPT systems[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 17247–17255. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2892321](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2892321).
- [22] LI Dong. Ergodic capacity of intelligent reflecting surface-assisted communication systems with phase errors[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(8): 1646–1650. doi: [10.1109/LCOMM.2020.2997027](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2997027).
- [23] LI Dong. How many reflecting elements are needed for energy- and spectral-efficient intelligent reflecting surface-assisted communication[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(2): 1320–1331. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3128544](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3128544).
- 王正强: 男, 副教授, 研究方向为无人机通信、下一代无线通信。
青思雨: 女, 硕士生, 研究方向为智能反射面通信、无人机通信。
万晓榆: 男, 教授, 研究方向为下一代无线通信。
樊自甫: 男, 教授, 研究方向为下一代无线通信。
徐勇军: 男, 副教授, 研究方向为反向散射通信。
多 滨: 男, 教授, 研究方向为无人机通信。

责任编辑: 马秀强