

无人机辅助的非正交多址反向散射通信系统max-min速率优化算法

王正强^{*①} 胡 扬^① 樊自甫^① 万晓榆^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: 无人机(UAV)、非正交多址(NOMA)和反向散射通信(BC)相结合,可以满足热点地区高容量需求,提高通信质量。该文提出一种无人机辅助的NOMA反向散射通信系统最小速率最大化资源分配算法。考虑无人机发射功率、能量收集、反射系数、传输速率以及连续干扰消除(SIC)解码顺序约束,建立基于系统最小速率最大化的资源分配模型。首先利用块坐标下降将原问题分解为无人机发射功率优化、反射系数优化和无人机位置与SIC解码顺序联合优化3个子问题,然后使用反证法给出无人机最优发射功率,再用变量替换法和连续凸逼近将剩余子问题进一步转化为凸优化问题进行求解。仿真结果表明,所提算法在系统和速率与用户公平性之间具有较好折中。

关键词: 反向散射通信; 无人机; 非正交多址; 资源分配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)07-2358-08

DOI: [10.11999/JEIT221210](https://doi.org/10.11999/JEIT221210)

Max-min Rate Optimization Algorithm for Non-Orthogonal Multiple Access Backscatter Communication System Assisted by Unmanned Aerial Vehicles

WANG Zhengqiang^① HU Yang^① FAN Zifu^① WAN Xiaoyu^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: The combination of Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), and Backscatter Communication (BC) can meet the high capacity demand and improve the communication quality in hotspots. A max-min rate optimization algorithm is proposed for UAV-assisted NOMA-based backscatter communication systems. Specifically, a resource allocation model is developed to maximize systems' minimum rate under the UAV transmit power, energy harvesting, reflection coefficient, transmission rate, and Successive Interference Cancellation (SIC) decoding order constraints. The original problem is divided into three subproblems: UAV transmit power optimization, reflection coefficient optimization, and joint optimization of UAV position and SIC decoding order optimization, which are handled by block coordinated decent method. Then, the UAV's optimal transmit power optimization subproblem is solved by contradiction. Furthermore, the remaining subproblems are solved by convex optimization with variable substitution and successive convex approximation methods. Finally, the simulation results show that the proposed algorithm has obtained a good tradeoff between the systems' sum rate and users' fairness.

Key words: Backscatter Communication(BC); Unmanned Aerial Vehicle(UAV); Non-Orthogonal Multiple Access(NOMA); Resource allocation

收稿日期: 2022-09-16; 改回日期: 2023-02-09; 网络出版: 2023-02-11

*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), 重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-K202200501), 重庆市博士后研究项目(2021XM3082), 中国博士后科学基金(2022MD723725)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701064,62271094), The Sichuan Regional Innovation Cooperation Project (2022YFQ0017), The Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJZD-K202200501), Chongqing Postdoctoral Research Project (2021XM3082), China Postdoctoral Science Foundation (2022MD723725)

1 引言

近年来,基于物联网在智能家居、智能城市等广泛应用前景,连接到网络的无线设备数量呈爆炸性增长,预计到2025年将有 5×10^{10} 台设备接入网络^[1]。由于电池容量的限制,无线设备的能量有限,传统更换电池的方式会给大规模无线设备的维护带来极高的制造成本和环境压力。在此背景下,研究人员提出了反向散射通信技术^[2](Backscatter Communication, BC)。在BC中,反向散射器(Backscatter Device, BD)是一种无源器件,它可以反射入射的射频(Radio Frequency, RF)信号来传输信息,而不使用复杂和耗电的有源射频元件,还可以从入射的RF信号中获取能量进行工作,从而大大降低电路的功耗^[3]。

另外,在无线通信中,无人机辅助通信由于易于部署、移动性强以及与地面用户具有良好的视距(Line of Sight, LoS)吸引了许多研究人员^[4]。同时,非正交多址(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术在基站处复用多个用户传输信号进行传输,接收端使用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术对信息进行解码,可同时服务大量用户^[5]。为提高通信质量,研究人员对BC, NOMA和无人机做了大量研究。

目前,对BC的研究已取得了许多成果。文献^[6]研究了多载波无线供电BC系统的总速率最大化问题,通过联合优化功率分配、时间分配、反射系数、能量分配系数来最大化信息传输阶段的反向散射数据速率和传输速率的总和速率。文献^[7]提出在不完美SIC的情况下对NOMA辅助的BC系统进行资源分配,通过联合优化基站的发射功率和BD的反射系数,提高系统的总速率。文献^[8]研究了考虑用户服务质量的基于NOMA的BC系统的资源分配,提出了一种基于丁克巴赫(Dinkelbach)和2次变换方法的迭代算法,通过联合优化基站的发射功率和反射系数,最大化用户的能效。文献^[9]研究了一个地面上的多个BD由其相关的地面载波发射器激活,并以时分多址的方式向无人机传输信息的BC系统。通过联合优化BD调度、反射系数、载波发射器的发射功率和无人机轨迹来最大化能效,并提出了一种基于块坐标下降(Block Coordinated Decent, BCD)和连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)方法的迭代算法来解决问题。文献^[10]研究了全双工无人机辅助的BC系统,上行链路采用NOMA协议,通过优化无人机的高度最大限度地增加上行链路中成功解码的比特数,同时最小化无人机的飞行时间。文献^[6-8]研究均考

虑地面固定基站且只有单个BD的情况,没有考虑无人机作为基站和多个BD的情况。文献^[9]考虑了无人机辅助的BC系统能效优化问题,但用户间公平性没有考虑。文献^[10]研究了全双工无人机辅助的BC系统的成功解码的比特数最大化问题,没有考虑对SIC解码顺序优化和BD之间速率公平性问题。在无人机作为基站情况下,基于NOMA的BC系统的解码顺序将依赖无人机的位置,因此需要联合考虑优化无人机位置以提高系统性能。

为了解决上述问题,本文针对无人机辅助的NOMA反向散射系统,研究系统最小速率最大化问题,主要贡献如下:

(1) 建立了无人机辅助的NOMA反向散射通信系统模型。在无人机发射功率、能量收集、反射系数、传输速率以及SIC解码顺序约束下,提出了多变量耦合的非凸最小速率最大化资源分配问题。

(2) 为求解上述非凸问题,利用BCD方法将原问题分解为无人机发射功率优化、反射系数优化和无人机位置与SIC解码顺序联合优化3个子问题;然后使用反证法求解无人机发射功率优化子问题,再用变量替换法和SCA将剩余子问题进一步转化为凸优化问题;最后,通过凸优化求解工具 CVX^[11]求解剩余子问题并迭代更新得到原问题的解。

(3) 仿真结果表明,与现有算法比较,所提算法具有较好的最小速率。

2 系统模型

如图1所示,本文考虑由1个全双工无人机、 N 个BD组成的BC系统。其中无人机配备双天线,BD配备单天线,BD集合定义为 $n \in \mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 。无人机飞行高度为 H ,无人机的水平位置为 $\mathbf{q} = [x_u, y_u]^T$,第 n 个BD的位置为 $\mathbf{w}_n = [x_n, y_n]^T$ 。本文假设无人机完全了解信道状态信息,并考虑BD和无人机之间的链路以LoS链路为主,基于自由空间路径损耗模型^[9],无人机到第 n 个BD的信道功率增益为 $h_n = \beta_0/d_n^2$,其中 $d_n = \sqrt{H^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_n\|^2}$ 是BD和无人机之间的距离, β_0 为参考距离1 m处的信道功率增益。

假设无人机发送的RF信号为 x 满足 $\mathbb{E}[|x|^2] = 1$,则第 n 个BD从无人机接收的信号为 $\sqrt{h_n P_u} x$,BD的接收功率为 $P_{\text{BD}_n}^r = P_u h_n$,其中 P_u 是无人机的发射功率。BD将接收到的信号分为两部分,一部分反射到无人机,另一部分用于自身的供能。用于自身供能部分信号为 $\sqrt{(1-r_n)h_n P_u} x$,BD采集的能量为 $E_n = \eta_n(1-r_n)P_u h_n$,其中 $\eta_n \in [0, 1]$ 是第 n 个BD的能量效率转换系数, $r_n \in [0, 1]$ 为第 n 个BD的

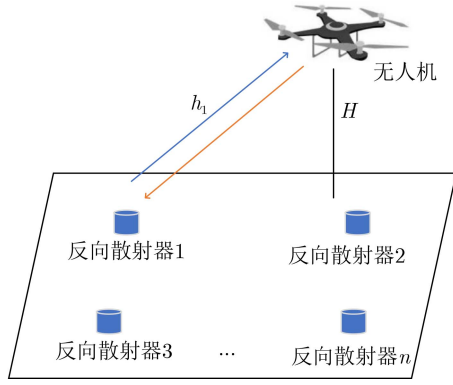


图1 系统模型

反射系数。BD的反射功率为 $P_{BD_n}^t = r_n P_{BD_n}^r$ 且反射到无人机的信号表示为 $x_n = \sqrt{r_n P_u h_n} a_n$ ，其中 a_n 为第 n 个BD的符号信号满足 $E[a_n^2] = 1$ 。由NOMA原理^[12]，无人机收到来自BD的信号为 $y = \sum_{n=1}^N \sqrt{P_{BD_n}^t} \sqrt{h_n} a_n + n_0 + x_{uu}$ ，其中 $n_0 \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 是加性高斯白噪声， σ^2 是噪声方差， x_{uu} 为无人机的自干扰。

无人机使用SIC对来自不同BD的消息进行解码，本文假设来自信道增益较差的BD的消息被视为对信道增益较强的BD的干扰，在解码来自信道增益较差BD的消息时，从接收到的消息中减去来自信道增益较强BD的消息^[13]。具体地，本文引入变量 $\alpha_{nm} \in \{0, 1\}, \forall n, m \in \mathcal{N}$ 来表示SIC解码顺序，其中 $\alpha_{nm} = 1$ 表示第 m 个BD比第 n 个BD到无人机的信道增益小，在无人机解码第 n 个BD的消息时，第 m 个BD的消息被视为干扰；否则 $\alpha_{nm} = 0$ 。因此， α_{nm} 的定义如式(1)

$$\alpha_{nm} = \begin{cases} 0, & d_n > d_m \\ 1, & d_n < d_m \\ 0 \text{ 或 } 1, & d_n = d_m \end{cases} \quad (1)$$

式(1)可以等价写为式(2)

$$\alpha_{nm} \in \{0, 1\}, \forall n \neq m, \quad (2a)$$

$$\alpha_{nn} = 0, \forall n, \quad (2b)$$

$$\alpha_{nm} + \alpha_{mn} = 1, \forall n \neq m, \quad (2c)$$

$$\alpha_{nm} (H^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_n\|^2) \leq H^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_m\|^2, \forall n \neq m \quad (2d)$$

假设无人机接收来自BD的信号时可以通过自干扰消除技术完全消除自身发射信号的干扰，且可用带宽是归一化的，因此第 n 个BD到无人机的速率可以表示

$$R_n = \log_2 \left(1 + \frac{P_u r_n h_n^2}{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_u r_m h_m^2 + \sigma^2} \right), \forall n.$$

考虑在无人机发射功率、反射系数、能量采集、传输速率以及SIC解码顺序约束下，建立最小速率最大化资源分配问题为

$$\begin{aligned} \max_{P_u, \mathbf{q}, \mathbf{R}, \mathbf{A}} \quad & \min_{1 \leq n \leq N} \log_2 \left(1 + \frac{P_u r_n h_n^2}{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_u r_m h_m^2 + \sigma^2} \right), \\ \text{s.t. C1: } & 0 \leq P_u \leq P_{\max}, \\ \text{C2: } & 0 \leq r_n \leq 1, \forall n, \\ \text{C3: } & P_c \leq \eta_n (1 - r_n) P_u h_n, \forall n, \\ \text{C4: } & \log_2 \left(1 + \frac{P_u r_n h_n^2}{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_u r_m h_m^2 + \sigma^2} \right) \\ & \geq R_{\min}, \forall n \end{aligned} \quad (3)$$

式(2a)一式(2d)

其中， $\mathbf{R} = \{r_n, \forall n\}$ 为反射系数， $\mathbf{A} = \{\alpha_{nm}, \forall n, m\}$ 为SIC解码顺序， P_c 是BD维持自身电路工作需要消耗的功率， $R_{\min}$ 为最小速率门限。问题式(4)是多变量耦合的非凸问题，不能直接采用凸优化求解。

3 资源分配算法

首先利用BCD方法将问题式(4)分解为无人机发射功率优化、反射系数优化和无人机位置与SIC解码顺序联合优化3个子问题。

3.1 求解最优无人机发射功率 P_u^*

固定无人机位置 $\mathbf{q}$ 、反射系数 $\mathbf{R}$ 和SIC解码顺序 $\mathbf{A}$ ，可得优化问题

$$\begin{aligned} \max_{P_u} \quad & \min_{1 \leq n \leq N} \log_2 \left(1 + \frac{P_u r_n h_n^2}{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_u r_m h_m^2 + \sigma^2} \right), \\ \text{s.t. C1, C3, C4} \end{aligned} \quad (4)$$

对于问题式(4)，通过反证法证明无人机的最优发射功率为最大发射功率，即定理1。

定理1 假设 P_u^* 为优化问题式(4)的最优解，则 $P_u^* = P_{\max}$ 。

证明 假设 P_u^* 为问题式(4)的最优解且 $P_u^* < P_{\max}$ 成立。接下来，构造一个新的可行解 $L = P_{\max}$ ，令 $\lambda = P_{\max}/P_u^*$ ，因为 $P_u^* < P_{\max}$ ，得到 $\lambda > 1$ 。接下来，分别证明 L 也满足C3和C4约束。

对于 P_u^* 满足约束C3有 $P_c \leq \eta_n (1 - r_n) P_u^* h_n$ ，通过 $\lambda = P_{\max}/P_u^*$ 将 P_u^* 替代得到

$$P_c \leq \lambda P_c \leq \eta_n(1-r_n)Lh_n \quad (5)$$

对于 P_u^* 满足约束C4有

$$\log_2 \left(1 + \frac{P_u^* r_n h_n^2}{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_u^* r_m h_m^2 + \sigma^2} \right) \geq R_{\min}, \text{ 类}$$

似地, 将 P_u^* 替代得到

$$\begin{aligned} & \log_2 \left(1 + \frac{L r_n h_n^2}{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} L r_m h_m^2 + \sigma^2} \right) \\ & \geq \log_2 \left(1 + \frac{L r_n h_n^2}{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} L r_m h_m^2 + \lambda \sigma^2} \right) \geq R_{\min} \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可看出 L 满足C3和C4约束且 L 得到系统最小速率大于 P_u^* 。这表明 L 是优化问题式(4)的最优解, 与假设相互矛盾, 因此定理1成立。

3.2 求解最优反射系数 R^*

固定无人机位置 $\mathbf{q}$ 和SIC解码顺序 $\mathbf{A}$, 引入辅助变量 t 并根据定理1, 可得优化问题

$$\max_{\mathbf{R}, t} t,$$

s.t. C2, C3,

$$\bar{C}4: \log_2 \left(1 + \frac{P_{\max} r_n h_n^2}{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_{\max} r_m h_m^2 + \sigma^2} \right) \geq t, \forall n$$

$$\bar{C}5: t \geq R_{\min} \quad (7)$$

使用变量替换令 $r_n = e^{x_n}$, 对于 $\bar{C}4$, 再令 $e^{t \ln 2 - 1} = e^k$ 可写为

$$k + \ln \left(\frac{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_{\max} e^{x_m} h_m^2 + \sigma^2}{P_{\max} e^{x_n} h_n^2} \right) \leq 0, \forall n \quad (8)$$

$$\text{其中, } \ln \left(\frac{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_{\max} e^{x_m} h_m^2 + \sigma^2}{P_{\max} e^{x_n} h_n^2} \right) \text{ 是一个}$$

log-sum-exp函数所以是凸函数, 因此式(8)是凸函数的下水平集为凸集。因此问题式(7)可以等价

$$\max_{\mathbf{x}, k},$$

$$\text{s.t. C1': } e^{x_n} \leq 1, \forall n,$$

$$\text{C2': } e^{x_n} \leq 1 - \frac{P_c}{\eta_n P_{\max} h_n}, \forall n$$

$$\text{C3': } k + \ln \left(\frac{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_{\max} e^{x_m} h_m^2 + \sigma^2}{P_{\max} e^{x_n} h_n^2} \right) \leq 0, \forall n$$

$$\text{C4': } k \geq \ln(2^{R_{\min}} - 1) \quad (9)$$

问题式(9)是凸问题, 因此可以使用凸优化内点算法, 通过CVX工具箱求解最优解。

3.3 求解最优无人机位置 $\mathbf{q}^*$ 和SIC解码顺序 $\mathbf{A}^*$

对于约束式(2a), 这是一个非凸约束, 它等价于式(10)

$$0 \leq \alpha_{nm} \leq 1, \forall n, m \quad (10a)$$

$$\alpha_{nm} - \alpha_{nm}^2 \leq 0, \forall n, m \quad (10b)$$

式(10a)是凸的, 式(10b)仍然是非凸的。若对式(10b)使用SCA, 由于式(10a)和式(10b)的联合存在, 会产生一些不可行的迭代问题^[14,15], 因此在目标函数中引入惩罚函数来松弛约束式(10b)并得到约束式(11)

$$\alpha_{nm} - \alpha_{nm}^2 \leq \varphi_{nm} \quad (11)$$

代入3.1节和3.2节求得的无人机发射功率 P_u^* 和反射系数 $\mathbf{R}^*$, 并引入辅助变量 s 可得优化问题

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{Y}, \mathbf{q}, \mathbf{A}, s} s - \mu \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \varphi_{nm} \\ & \text{s.t. C1'': } \log_2 \left(1 + \frac{P_{\max} r_n^* h_n^2}{\sum_{m=1, m \neq n}^N \alpha_{nm} P_{\max} r_m^* h_m^2 + \sigma^2} \right) \\ & \quad \geq s, \forall n \\ & \text{C2'': } s \geq R_{\min} \\ & \text{C3'': } H^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_n\|^2 \leq \frac{\eta_n (1 - r_n^*) P_{\max} \beta_0}{P_c}, \forall n \\ & \text{式(2b)一式(2d), 式(10a), 式(11)} \\ & \varphi_{nm} \geq 0, \forall n, m \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{Y} = \{\varphi_{nm} > 0, \forall n, m\}$ 是扩展约束式(10b)可行域的松弛变量集, $\mu > 0$ 是惩罚参数。问题式(12)在收敛时有 $\varphi_{nm} = 0, \forall n, m$ ^[14], 所以它和原问题是等价的, 对约束式(11)在 $\bar{\alpha}_{nm}$ 1阶泰勒展开有凸约束

$$\bar{\alpha}_{nm}^2 + 2\bar{\alpha}_{nm}(\alpha_{nm} - \bar{\alpha}_{nm}) + \varphi_{nm} \geq \alpha_{nm}, \forall n, m \quad (13)$$

此时2元约束式(2a)转化为式(10a)和式(13)两

个凸约束。对于约束式(2d), 在 $\bar{\mathbf{q}}$ 和 $\bar{\alpha}_{nm}$ 1阶泰勒展开有凸约束

$$\frac{\left(H^2 + \|\bar{\mathbf{q}} - \mathbf{w}_n\|^2 - \bar{\alpha}_{nm}\right) \left(H^2 + \|\bar{\mathbf{q}} - \mathbf{w}_n\|^2 + 2(\bar{\mathbf{q}} - \mathbf{w}_n)^T(\mathbf{q} - \bar{\mathbf{q}}) - \alpha_{nm}\right)}{2} + H^2 + \|\bar{\mathbf{q}} - \mathbf{w}_m\|^2 + 2(\bar{\mathbf{q}} - \mathbf{w}_m)^T \cdot (\mathbf{q} - \bar{\mathbf{q}}) \geq \frac{\left(H^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_n\|^2 + \alpha_{nm}\right)^2}{4} + \frac{\left(H^2 + \|\bar{\mathbf{q}} - \mathbf{w}_n\|^2 - \bar{\alpha}_{nm}\right)^2}{4}, \forall n \neq m \quad (14)$$

引入辅助变量 $\{b_n, \forall n\}$ 和 $\{c_n, \forall n\}$, 由于目标函数式(12)关于变量 s 的单调性, 约束C1''可以等价表示为式(15)

$$\log_2(1 + e^{b_n - c_n}) \geq s, \forall n \quad (15a)$$

$$\frac{\rho_0 r_n^*}{(H^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_n\|^2)^2} \geq e^{b_n}, \forall n \quad (15b)$$

$$1 + \sum_{m=1, m \neq n}^N \frac{\rho_0 \alpha_{nm} r_m^*}{(H^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_m\|^2)^2} \leq e^{c_n}, \forall n \quad (15c)$$

其中, $\rho_0 = P_{\max} \beta_0^2 / \sigma^2$ 。约束式(15a)—式(15c)均是非凸的, 下面使用SCA将它们转化为凸约束。对于约束式(15a), 与式(14)类似, 在 $\bar{b}_n$ 和 $\bar{c}_n$ 1阶泰勒展开有凸约束

$$\log_2\left(1 + e^{\bar{b}_n - \bar{c}_n}\right) + \frac{e^{\bar{b}_n - \bar{c}_n}}{(1 + e^{\bar{b}_n - \bar{c}_n}) \ln 2} \cdot (b_n - \bar{b}_n - c_n + \bar{c}_n) \geq s, \forall n \quad (16)$$

对于约束式(15b), 使用SCA得到凸约束

$$\frac{\left(H^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_n\|^2\right)^2}{\rho_0 r_n^*} \leq e^{-\bar{b}_n} (1 - b_n + \bar{b}_n), \forall n \quad (17)$$

对于约束式(15c), 引入辅助变量 $\{g_n, \forall n\}$ 和 $\{u_{nm}, \forall n, m\}$ 并将其改写为

$$g_n \leq (H^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_n\|^2)^2, \forall n \quad (18a)$$

$$\frac{\rho_0 \alpha_{nm} r_m^*}{g_m} \leq u_{nm}, \forall n \neq m \quad (18b)$$

$$1 + \sum_{m=1, m \neq n}^N u_{nm} \leq e^{c_n}, \forall n \quad (18c)$$

与式(14)类似, 使用SCA, 式(18a)—式(18c)可近似为凸约束

$$g_n \leq \left(H^2 + \|\bar{\mathbf{q}} - \mathbf{w}_n\|^2\right)^2 + 4 \left(H^2 + \|\bar{\mathbf{q}} - \mathbf{w}_n\|^2\right) \cdot (\bar{\mathbf{q}} - \mathbf{w}_n)^T (\mathbf{q} - \bar{\mathbf{q}}), \forall n \quad (19)$$

$$\rho_0 (\alpha_{nm} + r_m^*)^2 + (u_{nm} - g_m)^2 \leq 2(\bar{u}_{nm} + \bar{g}_m) \cdot (u_{nm} + g_m) - (\bar{u}_{nm} + \bar{g}_m)^2 + \rho_0 \left[2(\bar{\alpha}_{nm} - r_m^*) \cdot (\alpha_{nm} - r_m^*) - (\bar{\alpha}_{nm} - r_m^*)^2\right], \forall n \neq m \quad (20)$$

$$1 + \sum_{m=1, m \neq n}^N u_{nm} \leq e^{\bar{c}_n} (c_n - \bar{c}_n + 1), \forall n \quad (21)$$

其中, $\bar{g}_m, \bar{u}_{nm}$ 和 $\bar{c}_n$ 是给出的可行点。综上, 约束C1''已经转换为凸约束式(16)、式(17)、式(19)—式(21)。

根据上述转换, 问题式(12)转化为凸优化问题式(22)

$$\left. \begin{aligned} & \max_{Y, \mathbf{q}, \mathbf{A}, s, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{U}, \mathbf{G}} s - \mu \sum_{nm} \varphi_{nm} \\ & \text{s.t. C2'', C3'', 式(2b)、式(2c)、式(10a)、式(13)、} \\ & \quad \text{式(14)、式(16)、式(17)、式(19)、式(20)、式(21)、} \\ & \quad \varphi_{nm} \geq 0, \forall n, m \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

其中, $\mathbf{B} = \{b_n, \forall n\}, \mathbf{C} = \{c_n, \forall n\}, \mathbf{U} = \{u_{nm}, \forall n, m\}, \mathbf{G} = \{g_n, \forall n\}$, 问题式(22)可采用凸优化内点算法求解。

3.4 算法求解及复杂度分析

综上, 3个子问题全部解决。本节基于SCA迭代的最小速率最大化资源分配算法如[算法1](#)所示。在内循环中, 更新无人机位置和反射系数, 直到收敛。在外循环中, 最初将惩罚参数 μ 设置为足够小的值, 以便为 α_{nm} 提供足够的自由度, 然后逐步更

算法1 最小速率最大化资源分配算法

初始化: max-min速率 $R_{\max - \min}^0$, 内层迭代次数 $l = 0$, 外层迭代次数 $t = 0$, 惩罚参数 $\mu = \mu_0$, 步长 $\gamma = \gamma_0$; 无人机最大发射功率 $P_{\max}$, $\mathbf{q}^0, \mathbf{A}^0, \mathbf{B}^0, \mathbf{C}^0, \mathbf{U}^0, \mathbf{G}^0$; max-min速率收敛精度 ς_1 , 惩罚收敛精度 ς_2 , 外层最大迭代次数为 $T_{\max}$;

- (1) repeat
- (2) repeat
- (3) 根据给定的 $\mathbf{q}^l$ 和 $\mathbf{A}^l$ 利用凸优化内点法求解问题式(9)得到反射系数 $\mathbf{R}^*$;
- (4) 根据 $\mathbf{R}^*, \mathbf{B}^l, \mathbf{C}^l, \mathbf{U}^l, \mathbf{G}^l$ 利用凸优化内点法求解问题式(22)得到无人机位置 $\mathbf{q}^*$ 和SIC解码顺序 $\mathbf{A}^*$;
- (5) 更新 $l = l + 1$;
- (6) until $\left|R_{\max - \min}^{l+1} - R_{\max - \min}^l\right| < \varsigma_1$;
- (7) if $\max\{\varphi_{nm}\} > \varsigma_2$
- (8) 更新 $\mu = \gamma\mu$;
- (9) else
- (10) 更新 $t = t + 1$;
- (11) end if
- (12) until $t \geq T_{\max}$ 。

新惩罚参数 μ 。假设算法1的外循环迭代次数为 K_1 ，内循环迭代次数为 K_2 ，由文献[16]分析方法可知算法1复杂度为 $O(K_1 K_2 N^7 \log_2(1/\varsigma_1))$ 。

4 仿真结果与分析

本节通过分析仿真结果来验证所提算法的性能，仿真结果是通过200次蒙特卡罗模拟实验得到的。假设系统中有10个BD，它们随机部署在一个 $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 的正方形区域。其他参数设置如下， $\beta_0 = -10\text{ dB}$ ， $\eta = 0.6$ ， $\sigma^2 = -70\text{ dBm}$ ， $P_c = 0.25\text{ }\mu\text{W}$ [17]， $P_{\max} = 1.5\text{ W}$ ， $H = 15\text{ m}$ ， $R_{\min} = 0.8\text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ， $T_{\max} = 30$ [13]，无人机的初始位置部署在所有BD的几何中心。

为了进行比较，本文考虑以下3个基准方案：

(1) 几何中心方案：无人机被部署在所有BD的几何中心，只通过问题式(9)来优化反射系数。

(2) 频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)方案：类似于文献[18]中的OMA-TYPE-I，其中可用带宽被归一化，每个BD占用带宽与可用带宽比为 $1/N$ ，联合优化BD的反射系数和无人机位置。

(3) 和速率最大化方案：联合优化BD的反射系数和无人机的位置使该系统速率最大。

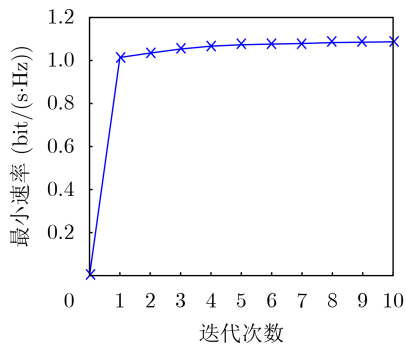
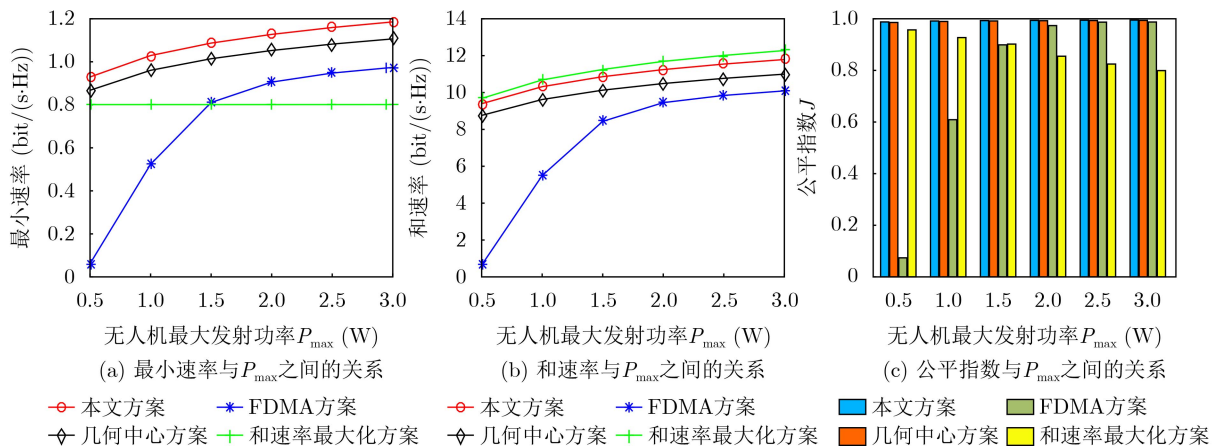


图2 本文方案迭代图



从图2可以看出，本文方案在经过7次迭代后趋于收敛，验证了本算法的收敛性。

在图3中，从图3(a)可以看出，系统最小速率随无人机发射功率门限的增加而增加。当 $P_{\max}$ 较小时，FDMA方案不能满足传输速率约束，因此最小速率为0。和速率最大化方案中，无人机会悬停在信道最强的BD附近，使其有最大的速率，而其余BD满足传输速率约束，因此最小速率接近 $R_{\min}$ 。从图3(b)可以看出，本文方案的和速率并不是最大，这是由于本文方案为了保证系统用户间速率分配公平性。从图3(c)可以看出，本文方案的公平性最好，其中公平指数由 $J = \left(\sum_{n=1}^N R_n \right)^2 / \left(N \sum_{n=1}^N R_n^2 \right)$ [19]计算。其中，和速率最大化方案的公平指数随着无人机发射功率门限增大而降低。这是因为无人机会悬停在信道最强的BD附近，使其有最大的速率，而其余BD满足传输速率约束，信道最强的BD速率会随着无人机发射功率增大而增大，导致公平性下降。

从图4(a)可以看出，系统最小速率随着无人机飞行高度的增加而减少。从图4(b)可以看出，本文方案的和速率并不是最大。从图4(c)可以看出随着无人机飞行高度增加，除了FDMA方案，其他方案的公平指数均增加。这是因为当无人机飞行高度增加到一定值时，每个BD到无人机的距离趋近一致，分配的速率也会趋近一致。无人机飞行高度增加到9 m后，FDMA方案的公平指数降低，这是因为无人机高度增加，信道增益变小，FDMA方案不能满足传输速率约束。

从图5(a)可以看出，系统最小速率随着BD数目增加而减少。从图5(b)可以看出，本文方案的和速率并不是最大。当BD数目增加到10，FDMA方案和速率下降，这是因为FDMA方案不能满足传输速率约束，此时和速率为0。从图5(c)可以看出，

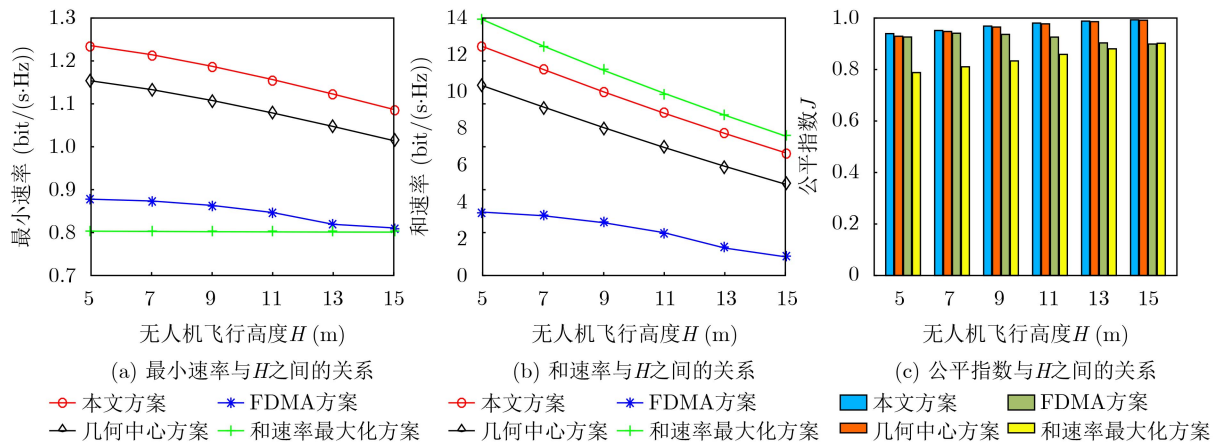
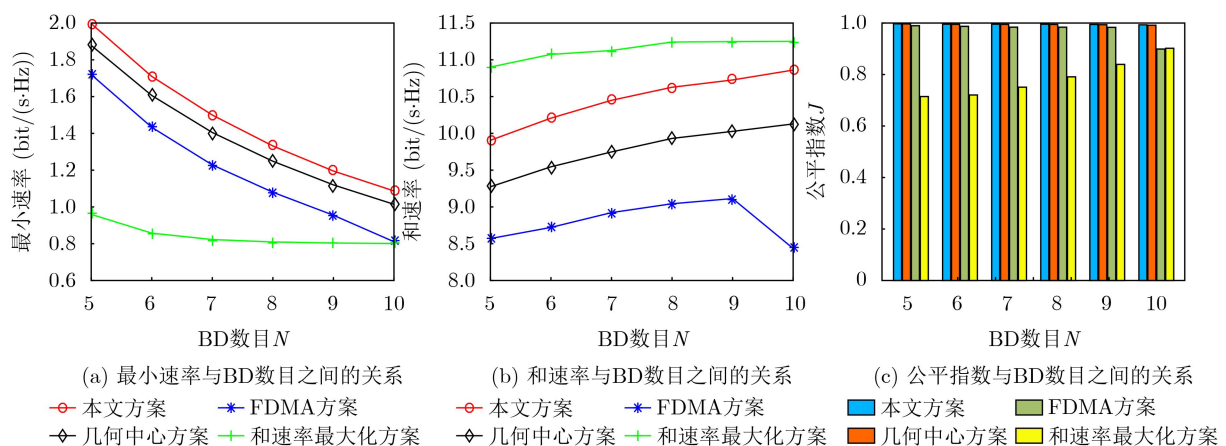
图4 不同方案下系统最小速率、和速率和公平指数与无人机飞行高度 H 之间的关系

图5 不同方案下系统最小速率、和速率和公平指数与BD数目之间的关系

本文方案的公平性最好。随着BD数目增加,和速率最大化方案公平指数增加,这是因为BD数目增加,信道最强的BD分配的资源减少,每个BD的速率差距减小。当BD数目增加到10,FDMA方案的公平指数下降,这是因为FDMA方案不能满足传输速率约束。

5 结束语

本文研究了无人机辅助的NOMA反向散射通信系统最小速率优化问题,考虑无人机发射功率、能量收集、反射系数、传输速率以及SIC解码顺序约束,建立了系统最小速率最大化资源分配模型。针对提出的优化问题,首先利用BCD将原问题分解为无人机发射功率优化、反射系数优化和无人机位置与SIC解码顺序联合优化3个子问题,然后使用反证法求解无人机发射功率优化子问题,再用变量替换法和SCA将剩余子问题转化为凸优化问题处理。仿真结果表明,本文方案相对于其他基准方案使得系统用户最小速率最大化,在系统和速率与用户公平性之间具有较好折中。在下一步的研究中可以进一步考虑物理层安全^[20]、隐蔽通信^[21]和智能反

射面^[22]的场景,并考虑实际应用中会遇到的一些问题,如BD采用的是非线性采集模型^[23]和系统由于估计误差、量化误差等存在非理想信道状态信息^[24]情况。

参考文献

- [1] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, *et al.* Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2347–2376. doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [2] VAN HUYNH N, HOANG D T, LU Xiao, *et al.* Ambient backscatter communications: A contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2889–2922. doi: 10.1109/COMST.2018.2841964.
- [3] BOYER C and ROY S. Backscatter communication and RFID: Coding, energy, and MIMO analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(3): 770–785. doi: 10.1109/TCOMM.2013.120713.130417.
- [4] WANG Zhe, DUAN Lingjie, and ZHANG Rui. Adaptive deployment for UAV-aided communication networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(9): 4531–4543. doi: 10.1109/TWC.2019.2926279.

- [5] WANG Zhengqiang, CHENG Qu, FAN Zifu, *et al.* A review of resource allocation studies for non-orthogonal multiple access system[J]. *Telecommunication Science*, 2018, 34(8): 136–146. doi: [10.11959/j.issn.1000-0801.2018236](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-0801.2018236).
 - [6] XU Yongjun and GUI Guan. Optimal resource allocation for wireless powered multi-carrier backscatter communication networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(8): 1191–1195. doi: [10.1109/LWC.2020.2985010](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2985010).
 - [7] KHAN W U, LI Xingwang, ZENG Ming, *et al.* Backscatter-enabled NOMA for future 6G systems: A new optimization framework under imperfect SIC[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(5): 1669–1672. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3052936](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3052936).
 - [8] XU Yongjun, QIN Zhijin, GUI Guan, *et al.* Energy efficiency maximization in NOMA enabled backscatter communications with QoS guarantee[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(2): 353–357. doi: [10.1109/LWC.2020.3031042](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3031042).
 - [9] 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).
 - [10] FARAJZADEH A, ERCETIN O, and YANIKOMEROGLU H. UAV data collection over NOMA backscatter networks: UAV altitude and trajectory optimization[C]. 2019 IEEE International Conference on Communications, Shanghai, China, 2019: 1–7. doi: [10.1109/ICC.2019.8761125](https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761125).
 - [11] GRANT M and BOYD S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming[EB/OL]. <http://cvxr.com/cvx>, 2020.
 - [12] ZHANG Ningbo, WANG Jing, KANG Guixia, *et al.* Uplink nonorthogonal multiple access in 5G systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(3): 458–461. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2521374](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2521374).
 - [13] LU Jinhui, WANG Yuntian, LIU Tingting, *et al.* UAV-enabled uplink non-orthogonal multiple access system: Joint deployment and power control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(9): 10090–10102. doi: [10.1109/TVT.2020.3005732](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3005732).
 - [14] VU Q D, NGUYEN K G, and JUNTITI M. Max-min fairness for multicast multigroup multicell transmission under backhaul constraints[C]. 2016 IEEE Global Communications Conference, Washington, USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2016.7841981](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7841981).
 - [15] NGUYEN T M, AJIB W, and ASSI C. A novel cooperative NOMA for designing UAV-assisted wireless backhaul networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(11): 2497–2507. doi: [10.1109/JSAC.2018.2874136](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2874136).
 - [16] WANG Zhengqiang, DU Jin, FAN Zifu, *et al.* Energy efficiency maximization for multi-carrier cooperative non-orthogonal multiple access systems[J]. *Digital Signal Processing*, 2022, 130: 103725. doi: [10.1016/j.dsp.2022.103725](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103725).
 - [17] LI Dong. Two birds with one stone: Exploiting decode-and-forward relaying for opportunistic ambient backscattering[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1405–1416. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2957490](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2957490).
 - [18] CHEN Zhiyong, DING Zhiguo, DAI Xuchu, *et al.* An optimization perspective of the superiority of NOMA compared to conventional OMA[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(19): 5191–5202. doi: [10.1109/TSP.2017.2725223](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2725223).
 - [19] WANG Zhengqiang, WAN Xiaoyu, WEI Xiao, *et al.* A closed-form power control algorithm in cognitive radio networks based on Nash bargaining solution[C]. The 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications, Chengdu, China, 2017: 681–685. doi: [10.1109/CompComm.2017.8322630](https://doi.org/10.1109/CompComm.2017.8322630).
 - [20] LI Xingwang, ZHENG Yike, KHAN W U, *et al.* Physical layer security of cognitive ambient backscatter communications for green Internet-of-Things[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 5(3): 1066–1076. doi: [10.1109/TGCN.2021.3062060](https://doi.org/10.1109/TGCN.2021.3062060).
 - [21] ZHANG Yanliang, HE Wenjing, LI Xingwang, *et al.* Covert communication in downlink NOMA systems with channel uncertainty[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(19): 19101–19112. doi: [10.1109/JSEN.2022.3201319](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3201319).
 - [22] LI Geng, LIU Huiling, HUANG Gaojian, *et al.* Effective capacity analysis of reconfigurable intelligent surfaces aided NOMA network[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, 2021(1): 198. doi: [10.1186/s13638-021-02070-7](https://doi.org/10.1186/s13638-021-02070-7).
 - [23] HUA Meng and WU Qingqing. Throughput maximization for IRS-aided MIMO FD-WPCN with non-linear EH model[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2022, 16(5): 918–932. doi: [10.1109/JSTSP.2022.3179840](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2022.3179840).
 - [24] LI Xingwang, ZHAO Mengle, ZENG Ming, *et al.* Hardware impaired ambient backscatter NOMA systems: Reliability and security[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(4): 2723–2736. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3050503](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3050503).
- 王正强：男，副教授，博士生导师，研究方向为无人机通信。
 胡 扬：男，硕士生，研究方向为反向散射通信。
 樊自甫：男，教授，硕士生导师，研究方向为下一代无线通信。
 万晓瑜：男，教授，博士生导师，研究方向为下一代无线通信。
 徐勇军：男，副教授，博士生导师，研究方向为反向散射通信。
 多 滨：男，教授，硕士生导师，研究方向为无人机通信。