

无人机辅助的 NOMA 网络用户分组与功率分配算法

李国权^{1,2}, 林金朝^{1,2}, 徐勇军^{1,3}, 黄正文⁴, 刘挺²

- (1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室, 重庆 400065;
3. 西安邮电大学陕西省信息通信网络及安全重点实验室, 陕西 西安 710121;
4. 布鲁内尔大学电子与计算机工程系, 伦敦 UB8 3PH)

摘 要: 为了提高传输的灵活性和应对应急通信的场景, 提出了一种基于无人机辅助的非正交多址接入系统用户分组与功率分配联合优化算法。考虑基站最大发射功率约束与用户分组约束, 构建了 NOMA 多用户和速率最大化的资源分配问题。为了解决该非凸问题, 基于图论提出了最大割定理下的用户分组算法, 实现了组内用户与无人机的相对距离最小。基于分组结果, 利用辅助变量法, 将原非凸功率分配子问题转化为凸优化问题求解。仿真结果表明, 所提算法具有较好的和速率性能。

关键词: 无人机; 非正交多址接入; 用户分组; 功率分配

中图分类号: TP929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020194

User grouping and power allocation algorithm for UAV-aided NOMA network

LI Guoquan^{1,2}, LIN Jinzhao^{1,2}, XU Yongjun^{1,3}, HUANG Zhengwen⁴, LIU Ting²

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. Chongqing Key Laboratory of Photoelectronic Information Sensing and Transmitting Technology, Chongqing 400065, China
3. Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China
4. Department of Electronic and Computer Engineering, Brunel University, London UB8 3PH, UK

Abstract: To improve the transmission flexibility of emergency communication scenarios, a joint user grouping and power allocation algorithm was proposed for UAV-aided non-orthogonal multiple access (NOMA) system. A sum-rate maximization resource allocation algorithm was formulated under the constraints of the maximum transmit power and the user grouping. To solve the non-convex problem, a graph-based user grouping algorithm was proposed to minimize the relative distance between the UAV and users. Based on the grouping result, the power allocation sub-problem was transformed into a convex one by using the auxiliary-variable approach. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm has better performance in terms of sum rates.

Key words: UAV, NOMA, user grouping, power allocation

1 引言

面对重大自然灾害和紧急突发事件, 有效的应

急通信对于提高救援效率和保障人民生命安全具有重要的意义。当发生事故或灾难时, 当地的固定基站通常不能正常使用, 而下一代通信系统中的无人

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-08-22

通信作者: 林金朝, linjz@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2019YFC1511300); 重庆市自然科学基金资助项目 (No.cstc2019jcyj-msxmX0666, No.cstc2019jcyj-xfzxX0002); 陕西省信息通信网络及安全重点实验室开放课题基金资助项目 (No.ICNS201904)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFC1511300), The Natural Science Foundation of Chongqing (No.cstc2019jcyj-msxmX0666, No.cstc2019jcyj-xfzxX0002), The Open Project of Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security (No.ICNS201904)

机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 具有更好的灵活性^[1], 特别是对于偏远地区或缺乏基站设施的地区, 应快速构建无人机空中基站。因此, 无人机为有序应对突发事件, 尽可能地降低其危害程度做出了重要的贡献^[2]。针对应急通信场景下频谱资源稀缺及基站毁坏的问题, 提升无人机系统的频谱效率具有重要意义。

非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 技术具有较高的频谱效率与较好的公平性, 被视为 5G 乃至下一代无线通信系统的关键技术^[3-5]。在功率域 NOMA 系统中, 信道条件好的用户被分配较低的功率分配因子, 而信道条件差的用户被分配较高的功率分配因子。在接收端, 利用串行干扰消除 (SIC, successive interference cancellation) 技术来消除部分用户的干扰, 实现更多用户在同一时频域复用, 从而提升频谱效率^[6]。

将 NOMA 引入无人机通信系统, 能够充分利用功率域资源, 从而保证空中基站为地面用户更好地传输信号 (下行链路) 或者保证空中无人机为地面用户更好地传输信号 (上行链路)。无人机系统主要受到视线 (LoS, line of sight) 链路的影响, 所以传统的瑞利衰落不适合表示其信道特性^[7]。

关于 UAV-NOMA 系统的研究, 按照信道特性分类, 主要有空对地 (A2G, air to ground) 信道、Nakagami-m 衰落信道、路径损耗信道和莱斯信道。针对考虑 A2G 信道的 UAV-NOMA 系统, 文献[8]研究了不同城市环境下的和速率最大化问题, 同时对比了固定与动态 UAV 高度的影响, 从而减少能耗。在相同的模型下, 文献[9]考虑了多用户服务质量约束, 将能效最大化问题等效为非线性分式规划问题, 其中基于信道条件的用户分组方案被考虑。针对考虑 Nakagami-m 衰落信道的 UAV-NOMA 系统, 文献[10]提出了以 UAV 为中心的卸载操作策略和以用户为中心的应急通信策略, 分别适用于密集网络与需要同时服务所有用户的场景, 从而提升系统覆盖概率。文献[11]则考虑了 LoS 链路与非视线 (NLoS, non-line of sight) 链路的影响, 利用随机几何模型来模拟用户与 UAV 的位置, 并且推导了系统中断概率与遍历速率的闭式表达式。针对 LoS 链路与非 LoS 链路场景, 文献[12]首先根据访问优先级确定用户分组方案, 再利用消息传递算法进行子信道分配, 最后联合优化 UAV-NOMA 系统的发射功率。文献[13]则研究了相同

模型下的多个旋转无人机辅助的上行 NOMA 系统, 并提出了基于 K 均值的 UAV 部署方案和基于坐标的用户分组方案。同时, 考虑了最小服务质量约束, 联合优化基于总功率最小化的资源分配问题。结果表明, UAV-NOMA 系统的频谱效率和能量效率得到有效提升^[12-13]。针对考虑路径损耗模型的 UAV-NOMA 系统, 文献[14]考虑了最小可达速率需求, 研究了联合 UAV 位置与功率分配优化问题来减小发射功率。文献[15]研究了联合 UAV 位置、接纳控制与功率分配优化问题, 利用惩罚函数法与连续凸逼近法来求解卡罗需-库恩-塔克 (KKT, Karush-Kuhn-Tucker) 收敛点, 从而提高 UAV-NOMA 系统的用户接入数。此外, 文献[16]将无人机引入车联网, 利用对偶分解法, 通过联合优化链路切换次数与链路传输速率来提高 UAV-NOMA 系统吞吐量。针对考虑莱斯信道的 UAV-NOMA 系统, 文献[17]考虑了上行干扰消除约束, 研究了联合 UAV 位置、地面基站位置、预编码优化问题, 从而提升地面用户的和速率。在相同的信道模型下, 文献[18]研究了上行 UAV-NOMA 系统的预编码优化问题, 考虑了 SIC 约束和速率需求约束, 利用一阶泰勒展开将上述优化问题转化为二阶圆锥规划问题, 从而提升系统和速率。文献[19]研究了总发射功率约束、总带宽约束、UAV 高度约束、天线波束宽度约束条件下的最大最小速率优化问题, 利用路径追踪算法求解, 得到有效的 UAV-NOMA 系统和速率提升。此外, 文献[20]研究了 UAV 旋转轨迹的优化问题, 从而降低了下行 UAV-NOMA 系统的中断概率。

上述关于 UAV-NOMA 系统的工作大多只考虑 UAV 高度、位置、轨迹的影响, 而缺乏对地面用户分组与功率分配联合优化问题的研究。因此, 本文主要研究 UAV-NOMA 系统中的动态用户分组与功率分配算法, 利用图论中的最大割定理与辅助变量法, 使 UAV-NOMA 系统的和速率性能得到较好的提升。本文主要贡献如下。

1) 在下行单小区多组场景下, 建立了一个基于无人机辅助的 NOMA 通信网络模型, 其中一个无人机作为空中基站, 服务多个地面用户, 而这些地面用户被均分到多个组。传统的 UAV-NOMA 系统通常假设每组用户数为 2, 即每组只包含一个近用户和一个远用户。为了更符合实际, 本文所提的 UAV-NOMA 系统将考虑组内用户数更多的情形。

2) 为了进一步提升 UAV-NOMA 系统的频谱效

率，考虑了基站最大发射功率约束与用户分组约束，构建了基于多用户和速率最大化的用户分组与功率分配联合优化问题。该问题是混合整数非线性规划问题，故难以求其闭式解。

3) 为了解决上述问题，提出了两步策略。首先，基于图论中的最大割定理，进行用户分组，保证用户与无人机的相对距离较小。然后，对每组用户分别执行基于多用户和速率最大化的功率分配子问题，通过辅助变量法将其转换为凸优化问题，从而得到每组用户的功率分配因子。

4) 仿真结果表明，本文算法在不同的覆盖半径、无人机高度、发射功率和信噪比下具有较好的和速率性能。

2 系统模型及问题描述

考虑一个下行 UAV-NOMA 系统，如图 1 所示。该系统包括一个含 N_t 根发射天线的 UAV 作为空中基站，工作在固定高度，且地面覆盖范围是半径为 R 的圆。此外，该系统具有 N 个单天线地面用户。假设 N 个用户被分为 T 组，每组有 K 个用户，并记第 t 组的第 k 个用户为 u_k^t ，定义组号集合为 $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ ，用户序号集合为 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ，组内用户序号集合为 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。所有组的用户 1 均匀分布在半径为 R_1 的小圆内，而所有组的用户 i 均匀分布在半径为 R_{i-1} 和 R_i 的同心圆环内。其中， $R_{i-1} < R_i$ ，且 $R_K = R$ ，同时定义用户覆盖半径集合为 $\mathfrak{R} = [R_1, R_2, \dots, R_K]$ 。此外，组内用户利用 NOMA 技术共享相同的时频域资源，而各组之间保持正交多址接入（OMA, orthogonal multiple access），即忽略组间干扰^[21]。

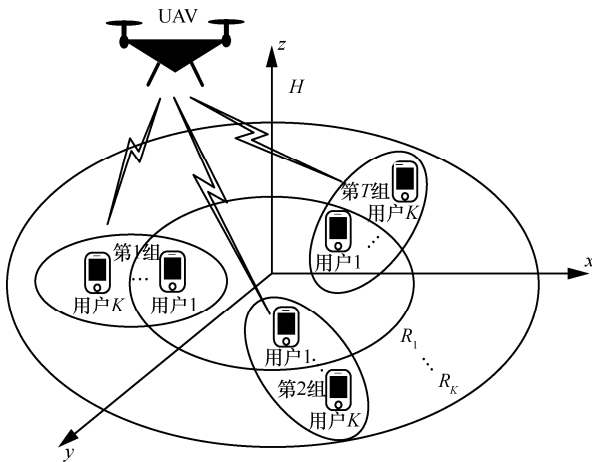


图 1 基于无人机的非正交多址接入系统模型

考虑一种由小尺度衰落和大尺度衰落构成的复合信道模型^[9-10]， $\mathbf{G}_i^t = \mathbf{D}_i^t \mathbf{H}_i^t \in \mathbb{C}^{N_t \times N_r}$ 表示用户 u_i^t 的信道矩阵。其中， \mathbf{D}_i^t 和 \mathbf{H}_i^t 分别表示用户 u_i^t 的大尺度衰落和小尺度衰落。大尺度衰落可进一步表示为 $\mathbf{D}_i^t = (d_i^t)^{-\alpha}$ 。其中， α 为路径损耗系数， d_i^t 为 UAV 与用户 u_i^t 之间的距离。小尺度衰落 $\mathbf{H}_i^t \in \mathbb{C}^{N_t \times N_r}$ 表示用户 u_i^t 的 Nakagami-m 衰落信道矩阵，并且每个元素的密度函数为 $f(x) = \frac{m^m x^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-mx}$ 。其中， m 为衰落参数^[10]， $\Gamma(m)$ 为卡方函数。当 m 为整数时， $\Gamma(m) = (m-1)!$ 。此外，UAV 与用户 u_i^t 之间的距离可表示为 $d_i^t = \sqrt{H^2 + \|\mathbf{z}_u - \mathbf{z}_i^t\|^2}$ ， H 为无人机的垂直工作高度； $\mathbf{z}_u = [x_u, y_u]^T \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 为 UAV 的水平坐标， x_u 和 y_u 分别为无人机垂直投影在水平地面的横坐标和纵坐标； $\mathbf{z}_i^t = [x_i^t, y_i^t]^T \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 为用户 u_i^t 的水平坐标， x_i^t 和 y_i^t 分别为用户垂直投影在水平地面的横坐标和纵坐标。

不失一般性，假设每组用户与 UAV 的相对距离排序为 $d_1^t < d_2^t < \dots < d_K^t$ ，则每组用户的信道增益排序为 $\|\mathbf{G}_1^t\|^2 > \|\mathbf{G}_2^t\|^2 > \dots > \|\mathbf{G}_K^t\|^2$ ^[3,5]。于是根据功率域 NOMA 原理，每组用户的功率分配因子排序可假设为 $\beta_1^t < \beta_2^t < \dots < \beta_K^t$ ，其中 β_k^t 表示第 t 组第 k 个用户的功率分配因子， $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K]$ 。

基于上述信道增益条件可知，每组用户 1 的信道环境最好，因此它可以利用 SIC 技术消除其他所有用户的干扰，则每组用户 1 的信干噪比（SINR, signal to interference plus noise ratio）可表示为

$$\text{SINR}_1^t = \frac{\beta_1^t P \gamma_1^t}{\sigma^2} \quad (1)$$

其中， P 为总发射功率， σ^2 为噪声功率， $\gamma_1^t = \text{tr}(\mathbf{G}_1^t (\mathbf{G}_1^t)^H)$ 为用户 u_1^t 的等价信道增益。

但是，对于每组其余用户而言，它们只能利用 SIC 技术消除信道较弱用户的干扰，并把信道较好用户的信号当作噪声。因此，对于任意用户 u_i^t ，其接收到的 SINR 可表示为

$$\text{SINR}_i^t = \frac{\beta_i^t P \gamma_i^t}{\sum_{k=1}^{i-1} \beta_k^t \gamma_k^t + \sigma^2} \quad (2)$$

其中， $\gamma_i^t = \text{tr}(\mathbf{G}_i^t (\mathbf{G}_i^t)^H)$ 为用户 u_i^t 的等价信道增益。

因此, UAV-NOMA 系统中用户和速率 R_{sum} 为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^K R'_i = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^K \text{lb}(1 + \text{SINR}'_i) \quad (3)$$

其中, R'_i 为用户 u'_i 的速率。

为了提升 UAV-NOMA 系统频谱效率和传输质量, 考虑基于系统和速率最大的用户分组与功率分配联合优化问题, 该优化问题可以表示为

$$\max_{\beta'_i, \mu'_i} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \mu'_i \text{lb} \left(1 + \frac{\beta'_i P \gamma'_i}{\sum_{k \neq i} \mu'_k \beta'_k P \gamma'_i + \sigma^2} \right) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } C_1: \sum_{i=1}^N \mu'_i \beta'_i P = P, \forall t \quad (5)$$

$$C_2: \sum_{i=1}^N \mu'_i \beta'_i = 1, \forall t \quad (6)$$

$$C_3: \sum_{t=1}^T \mu'_i = 1, \mu'_i \in \{0, 1\}, \forall i, t \quad (7)$$

$$C_4: \sum_{i=1}^N \mu'_i = \frac{N}{T}, \forall t \quad (8)$$

其中, C_1 表示基站最大功率约束, C_2 表示用户功率分子因子约束, C_3 表示一个用户至多分到一个组, C_4 表示每组用户数约束, $\mu'_i = 1$ 表示用户 i 属于第 t 组, $\mu'_i = 0$ 表示用户 i 不属于第 t 组^[22]。

显然, 上述问题是混合整数非线性规划问题, 故难以求解。为了使和速率达到最大化, 需要穷举搜索才能得到全局最优的用户分组方案, 而搜索次数高达 $\frac{(KT)!}{K^T}$ 次^[23]。当用户数很多时, 该方式不合理。

为此, 提出一种两步策略来减少复杂度。首先, 执行用户分组算法。然后, 对每组用户执行功率分配算法来得到次优解。

3 基于最大割定理的用户分组算法

本节将基于图论中的最大割定理提出低复杂度的用户分组算法。传统的用户分组方案通常只考虑用户的信道条件, 将信道条件最好的分到一组^[24], 或将信道差异最大的分到一组^[22]。但是, 上述方案都只考虑瑞利信道的影响。在复合信道模型下, UAV-NOMA 系统会受到 Nakagami-m 衰落信道的影响。因此, 传统的方案也许不适于无人机场景。

此外, 资源分配可等价于图论问题。文献[25]将车联网领域中的配对问题转化成图论中的最大割问

题, 将用户间干扰最小的用户分为一组, 从而保证车辆连接的可靠性。文献[26]将用户分组问题转换成图论中的寻找负价环问题来满足最小功率需求。然而, 在 UAV-NOMA 系统中, 用户与 UAV 的距离会影响系统性能。虽然假设用户与 UAV 的位置固定不变, 但是可通过图论中的最大割定理来减少组内用户到 UAV 的相对距离, 从而改善组内用户的信道状况。

假设分组前 N 个用户具有 \bar{T} 个初始组, 并且每个初始组包含 \bar{K} 个用户。此外, 需要满足式(7)和式(8)中的约束条件 C_3 和 C_4 。UAV-NOMA 系统中用户与 UAV 的相对距离关系可表示为无向图, 如图 2 所示。其中, 一个节点表示一个用户, 每 2 个节点间由一条边相连。边的权值为 $\omega_{a,b} = d_a + d_b$, 即 UAV 与用户 a 和用户 b 的距离之和。在满足分组约束的条件下, 保证组内用户与 UAV 的总距离最近。这是因为用户距离 UAV 越近, 则信道状况越好。

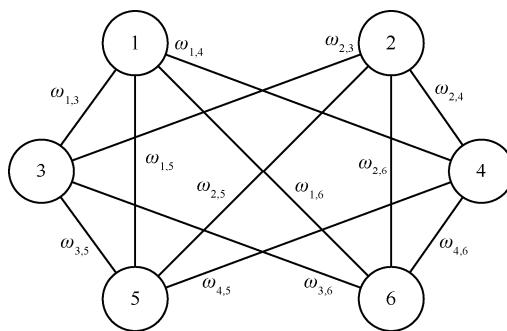


图 2 用户与 UAV 的相对距离关系

图 2 中优化用户与 UAV 的相对距离等价于图论中的最大割问题。已知图 $G = (V, E)$, 其中, V 表示地面所有用户的集合, V_i 表示第 i 个初始组的用户集合; E 表示边集合, $E_i \subseteq V_i \times \bar{V}_i$ 表示每次可被选择的边集合, \bar{V}_i 表示 K 的补集, 并且 $1 \leq i < \bar{T}$ 。当 $i=1$ 时, $E_i = \{e_{a,b} \in E; a \in V_i; b \in V - V_i\}$; 否则,

$$E_i = \left\{ e_{a,b} \in E - \sum_{j=1}^{i-1} E_j; a \in V_i; b \in V - \sum_{k=1}^i V_k \right\}。$$

对于无向图, 分组后所有用户被分到 T 个组, 因此 $G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_T = V$ 。显然, $T = \bar{K}$, 而分组后每组用户数 $K = \bar{T}$ 。此外, 根据所有已选边与未选边之和为边集 E , 可以得到

$$\sum_{i=1}^T \sum_{a,b \in G_i} \omega_{a,b} + \sum_{a' \in G_i, b' \in G_j, i \neq j} \omega_{a',b'} = \sum_{e \in E} \omega(e) \quad (9)$$

因此, 最大化 $\sum_{a' \in G_i, b' \in G_j, i \neq j} \omega_{a',b'}$ 等价于最小化

$\sum_{i=1}^T \sum_{a,b \in G_i} \omega_{a,b}$ 。这样可以保证每组用户与 UAV 的相

对距离最小，由此保证用户具有较好的信道状况。对于多用户分组，需要计算 K 个用户与 UAV 的距离之和，即 K 维相对距离 $\omega^K = (K-1) \sum_{i=1}^K d_i$ 。

下面，证明利用 K 维相对距离来实现最大割的可行性，有命题 1 成立。

命题 1 如果需要完成 K 个用户分组，并且所有用户 $a_i \in V_i$ ，则可以通过计算 ω^K ，而不是判断来自所有组合边的权值之和来确保 K 个用户与 UAV 的相对距离最小。

证明 对于任意的组内用户数 K 与组数 T ，已知每个用户均来自用户集合 V ，则有

$$\begin{aligned} \omega^K &= \omega_{1,2} + \omega_{1,3} + \cdots + \omega_{1,K} + \omega_{2,3} + \cdots + \omega_{K-1,K} = \\ & d_1 + d_2 + d_1 + d_3 + \cdots + d_1 + d_K + \\ & d_2 + d_3 + \cdots + d_{K-1} + d_K = (K-1) \sum_{i=1}^K d_i \end{aligned} \quad (10)$$

证毕。

本文所提基于最大割定理的用户分组算法如算法 1 所示。

算法 1 基于最大割定理的用户分组算法

输入 组数 T 、组内用户数 K 、每个用户与 UAV 的距离 d_i

输出 分组结果 G_t ，其中， $t=1,2,\dots,T$

- 1) for $t=1$ to T do
- 2) while 有用户尚未完成分组 do
- 3) 寻找 ω^K 的最小值
- 4) 将最小值情况下的每个用户 u_i 从其初始组依次分到新组 G_t ，并记为 u_i^t 。其中， $i=1,2,\dots,K$
- 5) end while
- 6) end for
- 7) 返回所有分组结果，算法结束

4 基于和速率最大化的功率分配算法

本节研究的功率分配算法是基于第 2 节中定义的信道增益排序假设。不失一般性，定义第 3 节的分组结果为 t^* 。基于该结果，式(4)问题可以等价如下功率分配子问题

$$\max_{\beta_i^*} \sum_{i=1}^K \text{lb} \left(1 + \frac{\beta_i^* P \gamma_i^*}{\sum_{k=1}^{i-1} \beta_k^* P \gamma_i^* + \sigma^2} \right)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^K \beta_i^* = 1 \quad (11)$$

其中，约束条件为每组用户的总功率分配因子约束。

虽然该约束条件是凸条件，但是目标函数分子分母存在耦合项，不易求解。利用辅助变量法^[27]定义非负辅助变量 c_i^* ，可以将目标函数缩放成

$$c_i^* \leq 1 + \frac{\beta_i^* P \gamma_i^*}{I_i^*} \quad (12)$$

其中， $I_i^* = \sum_{k=1}^{i-1} \beta_k^* P \gamma_i^* + \sigma^2$ 表示用户 u_i^t 的干扰与噪声之和。

通过最大化 $\prod_{i=1}^K c_i^*$ ，上述问题可以转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\beta_i^*, c_i^*} \prod_{i=1}^K c_i^* \\ & \text{s.t. } C_5: \sum_{i=1}^K \beta_i^* = 1 \\ & C_6: \frac{c_i^* I_i^*}{I_i^* + \beta_i^* P \gamma_i^*} \leq 1 \end{aligned} \quad (13)$$

其中， C_5 与式(11)相同， C_6 为辅助变量上界。

由于目标函数和约束条件是正项式，因此式(13)是几何规划问题。因此，通过改变变量， c_i^* 和 β_i^* 分别可转化为 $e^{c_i^*}$ 和 $e^{\beta_i^*}$ 。约束条件 C_2 可转换为

$$\ln(e^{c_i^*} I_i^*) - \ln(I_i^* + e^{\beta_i^*} P \gamma_i^*) \leq 0 \quad (14)$$

因此，式(13)可转换为

$$\begin{aligned} & \max_{\beta_i^*, c_i^*} \prod_{i=1}^K c_i^* \\ & \text{s.t. } C_7: \sum_{i=1}^K \beta_i^* = 1 \\ & C_8: \ln(e^{c_i^*} I_i^*) - \ln(I_i^* + e^{\beta_i^*} P \gamma_i^*) \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

其中，约束条件 C_7 为凸条件。至此，可以求得次优功率分配因子^[28]。

5 仿真结果

本节将通过仿真验证本文算法的有效性。当 Nakagami- m 衰落信道参数 $m > 1$ 时，表示 LoS 链路。不失一般性，假设 $m = 2$ ，路径损耗参数 $\alpha = 3$ ，且每组总发射功率 $P = 1$ W。此外，假设 UAV 的发射天线数为 4。为了方便地分析问题，定义如下几类算

法：本文算法，即联合本文所提的用户分组算法和功率分配算法；算法 1，即联合最强近用户与最强远用户 (BNBF, best-near best-far) 分组算法^[24]和固定功率分配算法^[21]；算法 2，即联合最强近用户与最弱远用户 (BNWF, best-near worst-far) 分组算法^[22]和固定功率分配算法^[21]，其中，地面用户的功率分配因子固定为 $\beta = [0.1, 0.9]$ 、 $\beta = [0.04, 0.06, 0.9]$ 、 $\beta = \left[\frac{1}{50}, \frac{2}{50}, \frac{3}{50}, \frac{44}{50} \right]$ 、 $\beta = \left[\frac{1}{50}, \frac{2}{50}, \frac{3}{50}, \frac{4}{50}, \frac{40}{50} \right]$ ，分别对应两用户、三用户、四用户和五用户的情形；算法 3，即联合 BNBF 用户分组算法^[24]与基于最小速率需求的功率分配算法^[29]。

图 3 对比了不同覆盖半径下两用户正交与非正交 UAV 系统和速率性能。其中，非正交 UAV 系统应用本文算法。此外，假设 $R_1 = 0.5 \text{ km}$ 、 $H = 0.5 \text{ km}$ 、 $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ 。由图 3 可知，与 OMA 方案相比，无人机在 NOMA 方案下具有更好的和速率性能。显然，随着组数 T 增大，非正交 UAV 系统的性能优势更明显。这表明应用本文算法的非正交 UAV 系统在用户数较多时仍具有较好的频谱效率。

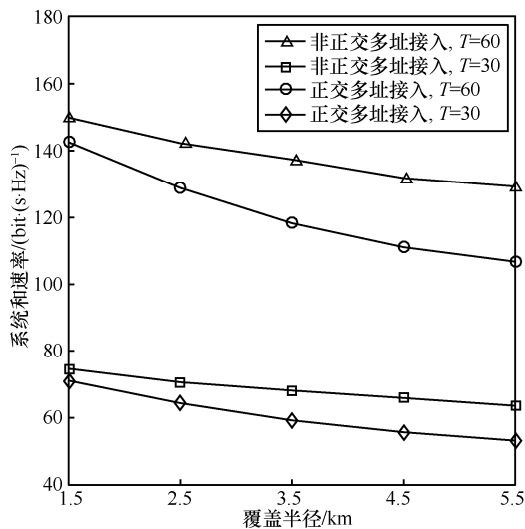


图 3 不同覆盖半径下两用户正交与非正交 UAV 系统和速率性能

图 4 给出了不同高度下两用户非正交 UAV 系统和速率性能。其中， $R_1 = 0.5 \text{ km}$ 、 $R_2 = 1.5 \text{ km}$ 、 $T = 10$ 、 $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ 。由图 4 可知，与其他动态算法相比，应用本文算法的 UAV-NOMA 系统具有更好的和速率性能。这表明本文算法的有效性，从而保证 UAV-NOMA 系统的工作高度更具灵活性。

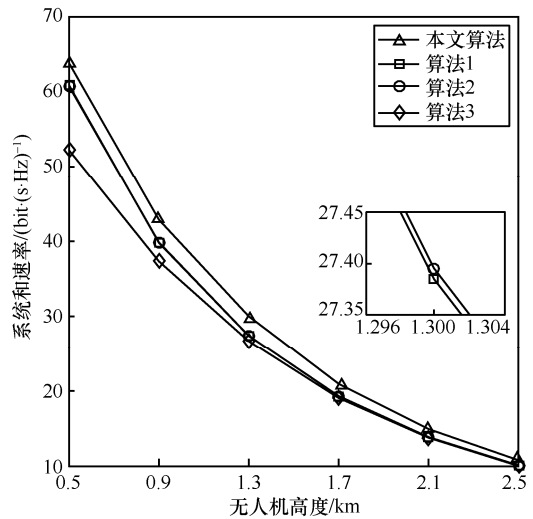


图 4 不同高度下两用户非正交 UAV 系统和速率性能

图 5 对比了不同功率下两用户非正交 UAV 系统和速率性能。其中，假设 $R_1 = 0.5 \text{ km}$ 、 $R_2 = 3 \text{ km}$ 、 $H = 1 \text{ km}$ 、 $T = 10$ 、 $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ 。显然，随着总发射功率的增加，UAV-NOMA 系统和速率也增加。其中，本文算法具有最优的和速率性能。因此，对比动态 BNBF、BNWF 算法、基于最小速率需求的功率分配算法，本文算法使 UAV-NOMA 系统的频谱效率得到较好提升。

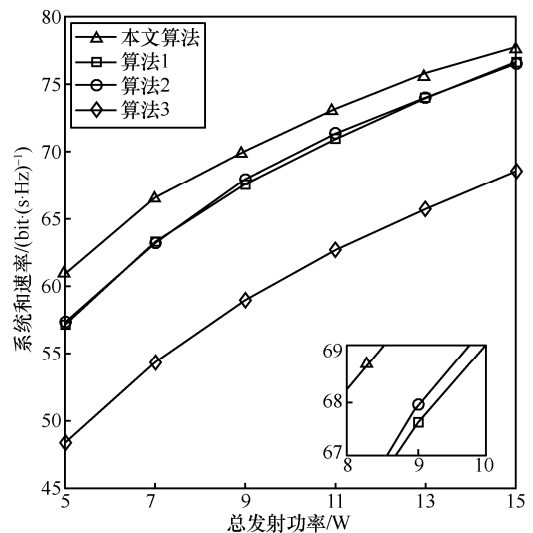


图 5 不同功率下两用户非正交 UAV 系统和速率性能

图 6 给出了不同信噪比下两用户非正交 UAV 系统和速率性能。其中， $R_1 = 0.5 \text{ km}$ 、 $R_2 = 3 \text{ km}$ 、 $H = 1 \text{ km}$ 、 $T = 10$ 、 $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ 。由图 6 可知，本文算法具有最优的和速率性能。对比传统的动态用户分组算法^[22,24]与功率分配算法^[5,29]，本文算法与基于和速率最大化的功率分配算法更适于

Nakagami-m 衰落信道下的两用户 UAV-NOMA 系统。

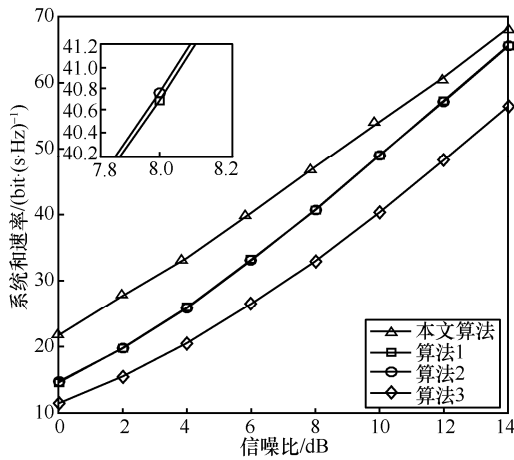


图6 不同信噪比下两用户非正交 UAV 系统和速率性能

图7对比了不同信噪比下三用户非正交 UAV 系统和速率性能。其中, $R_1=0.5$ km、 $R_2=1$ km、 $R_3=3$ km、 $H=1$ km、 $T=10$ 、 $SNR=5$ dB。由图7可知, 本文算法在三用户场景下也具有相对最优的和速率性能。

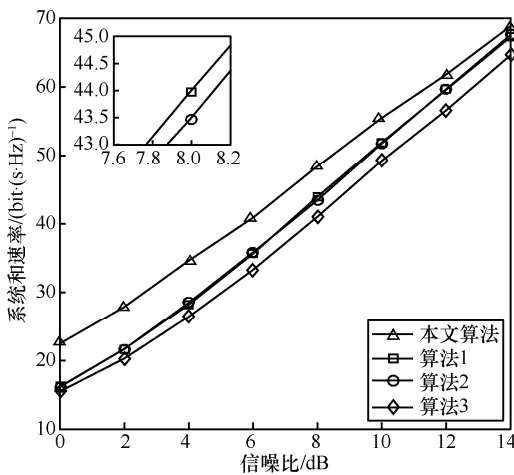


图7 不同信噪比下三用户非正交 UAV 系统和速率性能

图8给出了不同信噪比下四用户和五用户非正交 UAV 系统和速率性能比较。其中, $\mathcal{R}=[0.5, 1.5, 2.5, 3]$ 和 $\mathcal{R}=[0.5, 1, 1.5, 2, 3]$ 分别代表四用户和五用户 UAV-NOMA 系统中各用户的覆盖半径。此外, $H=1$ km、 $T=10$ 、 $SNR=5$ dB。显然, 在相同的组内用户数 K 下, 本文算法具有更优的和速率性能。另外, 五用户系统和速率性能比四用户系统和速率性能更好, 这表明本文算法比其他传统算法更适用于用户数较多的情形。

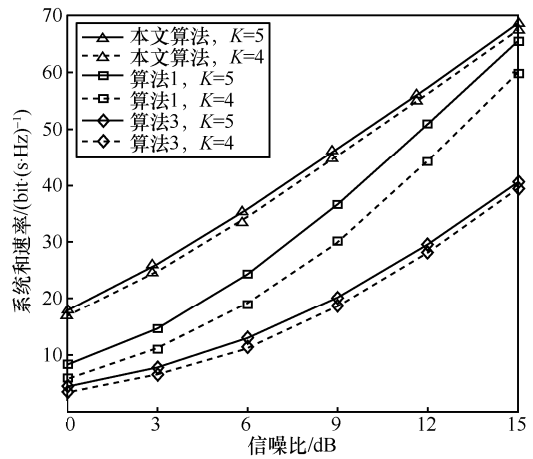


图8 不同信噪比下四用户和五用户非正交 UAV 系统和速率性能

6 结束语

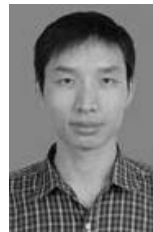
本文研究了基于无人机辅助的 NOMA 网络的联合用户分组与功率分配算法, 从而进一步提升了无人机系统的频谱利用率。本文算法能够动态地进行用户分组, 并且得到每组用户的功率分配因子。仿真结果表明, 对比正交 UAV 系统, 应用本文算法的非正交 UAV 系统在不同覆盖半径条件下具备更好的系统和速率性能。此外, 针对不同 UAV 高度、不同发射功率、不同信噪比等情形, 非正交 UAV 系统在设计应用本文算法时都具备较好的和速率性能。同时, 对比随机用户分组, 动态 BMBF、BNWF 用户分组, 以及固定功率分配、最小速率需求功率分配算法, 本文所提的基于最大割定理的用户分组算法与基于和速率最大化的功率分配算法具有更好的稳健性, 从而有效地提升了 Nakagami-m 衰落信道下的 UAV-NOMA 系统的频谱效率。后续工作将重点考虑组间干扰与不完备信道状态信息的影响, 同时设计上行多小区多组场景下旋转无人机辅助的 NOMA 网络启发式功率分配算法。

参考文献:

- [1] 张治, 熊天波, 陈建桥, 等. 无人机三维空地信道模型的空间特性研究[J]. 通信学报, 2020, 41(2): 123-130.
ZHANG Z, XIONG T B, CHEN J Q, et al. Research on the spatial characterization of a 3D UAV air-to-ground channel model[J]. Journal on Communications, 2020, 41(2): 123-130.
- [2] NASIR A A, TUAN H D, DUONG T Q, et al. UAV-enabled communication using NOMA[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(7): 5126-5138.
- [3] 徐勇军, 李国权, 陈前斌, 等. 基于非正交多址接入异构携能网络稳健能效资源分配算法[J]. 通信学报, 2020, 41(2): 84-96.
XU Y J, LI G Q, CHEN Q B, et al. Robust energy efficiency for

- SWIPT-enabled heterogeneous NOMA network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(2): 84-96.
- [4] 徐勇军, 彭瑶, 余晓磊, 等. 面向 5G 协作通信系统的资源分配技术综述[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2019, 31(2): 143-157.
XU Y J, PENG Y, YU X L, et al. Survey on resource allocation techniques for 5G cooperative communication networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2019, 31(2): 143-157.
- [5] YANG Z, DING Z G, FAN P Z, et al. A general power allocation scheme to guarantee quality of service in downlink and uplink NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(11): 7244-7257.
- [6] HONG Z J, LI G Q, XU Y J, et al. User grouping and power allocation for downlink NOMA-based quadrature spatial modulation[J]. *IEEE Access*, 2020, 8(2020): 38136-38145.
- [7] LIU Y W, QIN Z J, CAI Y L, et al. UAV communications based on non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 52-57.
- [8] SOHAIL M F, LEOW C Y, WON S. Non-orthogonal multiple access for unmanned aerial vehicle assisted communication[J]. *IEEE Access*, 2018, 6(2018): 22716-22727.
- [9] SOHAIL M F, LEOW C Y, WON S. Energy-efficient non-orthogonal multiple access for UAV communication system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(11): 10834-10845.
- [10] HOU T W, LIU Y W, SONG Z Y, et al. Exploiting NOMA for UAV communications in large-scale cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(10): 6897-6911.
- [11] HOU T W, LIU Y W, SONG Z Y, et al. Multiple antenna aided NOMA in UAV networks: a stochastic geometry approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(2): 1031-1044.
- [12] LIU M, GUI G, ZHAO N, et al. UAV-aided air-to-ground cooperative non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(4): 2704-2715.
- [13] WANG J, LIU M, SUN J L, et al. Multiple unmanned aerial vehicles deployment and user pairing for non-orthogonal multiple access schemes[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.3015702.
- [14] HU D K, ZHANG Q, LI Q Z, et al. Joint position, decoding order, and power allocation optimization in UAV-based NOMA downlink communications[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, doi: 10.1109/JSYST.2019.2940985.
- [15] TANG R, CHENG J L, CAO Z X. Joint placement design, admission control, and power allocation for NOMA-based UAV systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(3): 385-388.
- [16] 范茜莹, 黄传河, 朱钧宇, 等. 无人机辅助车联网环境下干扰感知的节点接入机制[J]. *通信学报*, 2019, 40(6): 90-101.
FAN X Y, HUANG C H, ZHU J Y, et al. Interference-aware node access scheme in UAV-aided VANET[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(6): 90-101.
- [17] LIU L, ZHANG S W, ZHANG R. Exploiting NOMA for multi-beam UAV communication in cellular uplink[C]//*IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [18] PANG X W, GUI G, ZHAO N, et al. Uplink precoding optimization for NOMA cellular-connected UAV networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(2): 1271-1283.
- [19] NASIR A A, TUAN H D, DUONG T Q, et al. UAV-enabled communication using NOMA[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(7): 5126-5138.
- [20] SHARMA P K, KIM D I. UAV-enabled downlink wireless system with non-orthogonal multiple access[C]//*IEEE Globecom Workshops*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [21] HONG Z J, LI G Q, LIN J Z, et al. Power allocation for downlink multiuser NOMA-based generalized spatial modulation[C]//*International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [22] ALI M S, TABASSUM H, HOSSAIN E. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) system[J]. *IEEE Access*, 2016, 4(2016): 6325-6343.
- [23] KANG J M, KIM I M. Optimal user grouping for downlink NOMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(5): 724-727.
- [24] DO N T, COSTA D B D, DUONG T Q, et al. A BNB user selection scheme for NOMA-based cooperative relaying systems with SWIPT[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(3): 664-667.
- [25] LIANG L, XIE S J, LI G Y, et al. Graph-based resource sharing in vehicular communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(7): 4579-4592.
- [26] GUO F Q, LU H C, ZHU D R, et al. Interference-aware user grouping strategy in NOMA systems with QoS constraints[C]//*IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1378-1386.
- [27] BJÖRNSON E, HOYDIS J, SANGUINETTI L. Massive MIMO networks: spectral, energy, and hardware efficiency[J]. *Foundations and Trends in Signal Processing*, 2017, 11(3-4): 154-655.
- [28] GRANT M, BOYD S. "Graph implementations for non-smooth convex programs" in recent advances learning and control[M]. Berlin: Springer, 2008: 95-110.
- [29] DO N T, COSTA D B D, DUONG T Q, et al. Improving the performance of cell-edge users in MISO-NOMA systems using TAS and SWIPT-based cooperative transmissions[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2018, 2(1): 49-62.

[作者简介]



李国权(1980—), 男, 河南方城人, 博士, 重庆邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为 MIMO 无线通信传输技术、异构无线网络传输技术等。

林金朝(1966—), 男, 四川蓬溪人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信传输技术、BAN 与信息处理技术等。

徐勇军(1986—), 男, 湖北赤壁人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为认知无线电、异构无线网络资源分配算法与性能分析等。

黄正文(1981—), 男, 安徽合肥人, 伦敦布鲁内尔大学讲师、高级研究员, 主要研究方向为人工智能、复杂系统优化、数据分析等。

刘挺(1980—), 男, 陕西西安人, 博士, 光电信息检测与传输技术重庆市重点实验室副研究员, 主要研究方向为加密算法、无线通信与光纤通信技术。