

# 室内 VLC-NOMA 网络的协作多点用户 接入和功率分配

刘焕淋<sup>1</sup>, 胡 阳<sup>1</sup>, 陈 勇<sup>2</sup>, 张 彤<sup>1</sup>, 袁夕淋<sup>1</sup>, 陈浩楠<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065)

**摘 要:** 可见光通信与非正交多址技术结合, 是满足室内高速通信和宽带数据接入的重要方法. 由于室内密集设备通信需求增长, 小区间干扰和资源紧缺日趋严重, 为了降低小区间干扰, 进一步增强室内用户设备高速通信的用户体验质量(Quality of Experience, QoE)和提高可见光通信的频谱资源利用率, 提出室内基于非正交多址接入的可见光通信(Visible Light Communication-Non-Orthogonal Multiple Access, VLC-NOMA)协作多点用户接入和功率分配算法. 在用户接入阶段, 设计基于 QoE 和多接入点协作的用户接入(User Access algorithm based on User Experience Quality and Coordinated Multipoint, UA-UEQCM)算法, 根据用户需求的最小速率、推荐速率值和 VLC-NOMA 提供的可达速率, 评估用户的 QoE 值和等效的用户满意度值; 然后, 基于 VLC-NOMA 中用户需求的平均意见评分(Mean Opinion Score, MOS)和 VLC 接入点协作可用资源, 设计 NOMA 用户组的效用函数优化用户设备与多个接入点协作接入的双向选择, 提高 VLC-NOMA 网络的 MOS 值; 在功率分配阶段, 采用改进教与学优化方法优化 NOMA 组的功率分配, 设计 VLC-NOMA 的总 MOS 值为适应度函数值, 采用自适应更新和学习模式, 优化 NOMA 组的功率分配因子. 仿真结果显示, 与其他接入算法和功率分配比较, 当用户数目为 26 时, 本文提出的接入算法和功率分配分别比 VLC-NOMA 网络的总 MOS 值提高 18.06% 和 10.94%.

**关键词:** 可见光通信; 非正交多址接入; 协作多点; 用户接入; 功率分配; 体验质量

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.51977021); 重庆市自然科学基金(No.CSTB2023NSCQ-MSX0734)

**中图分类号:** TN929.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)12-4009-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20230891

## Coordinated Multipoint Based User Access and Power Allocation for Indoor VLC-NOMA Network

LIU Huan-lin<sup>1</sup>, HU Yang<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>, ZHANG Tong<sup>1</sup>, YUAN Xi-lin<sup>1</sup>, CHEN Hao-nan<sup>2</sup>

(1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and  
Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The combination of visible light communication (VLC) and non-orthogonal multiple access (NOMA) technology is an important method to meet the needs of indoor high speed communication and broadband data access. Due to the increasing demand for indoor dense communication, inter cell interference (ICI) and resource scarcity are becoming increasingly severe. In order to reduce the ICI, further enhance the quality of experience (QoE) of indoor user's high-speed communication, and improve the spectrum resource utilization for VLC, a collaborative multi-point user access and power allocation algorithm is proposed for indoor VLC-NOMA. In the user access stage, a user access algorithm based on user needs of QoE and coordinated multi-point (UA-UEQCM) accessing VLC is designed. We can evaluate the QoE and equivalent mean opinion score (MOS) in terms of user's satisfaction value, according to the minimum rate required by user, the recommended rate value required by user, and the achievable rate provided by VLC-NOMA. Then, based on the MOS user required and the available resource of coordinated access point in VLC-NOMA, a utility function of NOMA group is put forward to optimize the bidirectional selection between user equipment and coordinated multiple access points of VLC for improving MOS in VLC-NOMA network. In the power allocation stage, a power allocation algorithm by using improved

teaching and learning (PA-ITL) is adopted to optimize the power allocation of the NOMA group. We design the total MOS value of VLC-NOMA as the fitness function value, and use adaptive updating and learning modes to optimize the NOMA group's power allocation factor. The simulation results show that, compared with the comparison user access algorithm and power allocation, when the number of users is 26, the proposed user access algorithm and power allocation can improve the total MOS value by up to 18.06% and 8.60% for indoor VLC-NOMA networks, respectively.

**Key words:** visible light communication; non-orthogonal multiple access; coordinated multi-point; user access; power allocation; quality of experience

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.51977021); Science Foundation Project of Chongqing Science and Technology Commission (No.CSTB2023NSCQ-MSX0734)

## 1 引言

随着移动互联网和万物智联应用的发展,射频(Radio Frequency, RF)通信面临着频谱短缺和数据接入拥塞的压力<sup>[1]</sup>,难以满足室内大量数据通信需求.而满足室内照明的发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为可见光通信(Visible Light Communication, VLC)的载体,为未来无线通信提供高速率、宽带宽、高能效、低成本解决方案<sup>[2]</sup>,被认为是未来的重要通信技术之一<sup>[3]</sup>.

为进一步提高室内 VLC 的频谱资源利用率和用户的接入速率,研究者积极将非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)<sup>[4]</sup>技术应用到 VLC 网络中构成 VLC-NOMA 网络.

VLC AP 密集部署被证明是提升网络容量的有效方案.但是,该方案易导致严重的小区间干扰(Inter-Cell Interference, ICI);此外, NOMA 采用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)解码易导致小区边缘用户受 NOMA 组间干扰,降低网络性能和用户体验质量(Quality of Experience, QoE). Zhang 等人<sup>[5]</sup>提出基于用户位置的 NOMA 分组方案,设计考虑 SIC 解码残余干扰的功率分配(Power Allocation, PA),在保证 QoE 的同时提高网络吞吐量.在文献[6]中,作者使用协作 NOMA 为 VLC 多小区内的偶数个用户服务,提高 QoE.然而,文献[5,6]所提方案都忽略 ICI 影响.

为了减轻 ICI 的影响,UE 接入多个 VLC 接入点(Access Point, AP)的协作多点(Coordinated Multi-point, CoMP)<sup>[7]</sup>传输的方法被引入到 VLC 网络中.文献[7]证明:CoMP 方法能降低 ICI,提高用户信干噪比(Signal to Interference Noise Ratio, SINR);并提出基于信道增益和距离阈值的用户接入(User Access based on Channel Gain Threshold and Distance Threshold, UACGTD)和频谱资源分配方法.但是,CoMP 在降低 ICI 同时,可能降低频谱资源利用率<sup>[8]</sup>.文献[9]具体分析了多小区网络中 NOMA 技术与 CoMP 技术结合的性能.

随着为多元化的高质量多媒体服务增长,QoE 受到越来越多重视<sup>[10,11]</sup>. Sun 等<sup>[12]</sup>提出通过平均意见评分

(Mean Opinion Score, MOS)衡量 RF-NOMA 网络用户的 QoE 方法,并设计一种线性搜索算法提高 RF-NOMA 的 MOS.

基于上述分析,论文在研究室内 VLC-NOMA 网络的下行协作多点接入和 PA 优化方法,设计基于用户 QoE 和协作多点的用户接入(User Access algorithm based on User Experience Quality and Coordinated Multi-point, UA-UEQCM)算法,并设计基于改进的教与学方法优化功率分配(Power Allocation algorithm based on Improved Teaching and Learning, PA-ITL),以提高 QoE 性能.

## 2 系统模型

### 2.1 系统模型

如图 1 所示,室内下行 VLC-NOMA 网络由  $M$  个 VLC AP 和  $N$  个 UE 组成,每个 VLC AP 频谱资源被分为  $K$  个资源块(Resource Block, RB),每个 NOMA 用户组使用 1 个 RB; CoMP UE 所在 NOMA 用户组构成一个 CoMP NOMA 集群,同一 CoMP NOMA 集群中的 NOMA 用户组使用相同的 RB 传输数据.每个 VLC AP 配置 1 个 LED,每个 UE 配置 1 个光电探测器(Photo Detector, PD). VLC AP 集合为  $M$ , UE 集合为  $N$ , NOMA 用户组集合为  $K$ ,  $S_k^m$  表示 VLC AP  $m$  的第  $k$  个 NOMA 用户组,  $U_{k,n}^m$  表示 VLC AP  $m$  的第  $k$  个 NOMA 组的 UE  $n$ .

### 2.2 系统模型

如图 1 所示, VLC 主要依靠 LED 的朗伯辐射视线

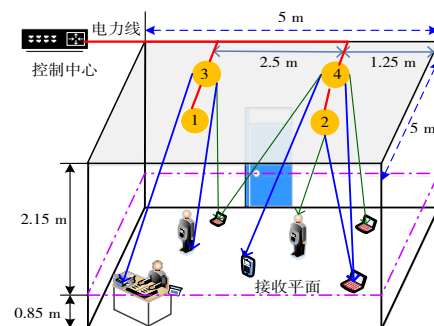


图 1 基于 CoMP 的室内 VLC-NOMA 系统模型

(Line Of Sight, LOS)链路传输数据, VLC AP  $m$  和 UE  $n$  的 PD 间信道增益为<sup>[6,13]</sup>

$$h_{m,n} = \begin{cases} \frac{(w+1)A}{2\pi d_{m,n}^2} \cos^w(\theta)T(\phi)g(\phi)\cos(\phi), & 0 \leq \phi \leq \psi_F \\ 0, & \phi > \psi_F \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $A$  为 PD 接收面积;  $w$  为朗伯辐射系数,  $w = -\ln 2 / \ln[\cos(\theta_{1/2})]$ ,  $\theta_{1/2}$  为 LED 半功率角;  $d_{m,n}$  为 LED  $m$  和 UE  $n$  间距离;  $\theta$  和  $\phi$  分别是 LED  $m$  发射角和 UE  $n$  接收角;  $\psi_F$  为 PD 视场角(Field of View, FoV);  $T(\phi)$  为光滤波器增益;  $g(\phi)$  为光集中器增益.

UE  $n$  接入  $S_k^m$  的 SINR 为<sup>[14]</sup>

$$\Gamma_{k,n}^m = \frac{\mu_{k,n}^m P_{k,n}^m \gamma^2 |h_{m,n}|^2}{I_n^I + I_n^C + N_0 B} \quad (2)$$

式中,  $N_0$  为高斯白噪声的功率谱密度;  $B$  为  $S_k^m$  的带宽;  $I_n^I$  和  $I_n^C$  表示 UE  $n$  的 NOMA 用户组内干扰和 VLC AP 小区间干扰, 而组内干扰与 SIC 解码顺序有关<sup>[15]</sup>; 若 UE  $n$  加入  $S_k^m$ ,  $\mu_{k,n}^m = 1$ , 否则,  $\mu_{k,n}^m = 0$ ;  $P_{k,n}^m$  表示 VLC AP  $m$  分配给  $U_{k,n}^m$  的发射功率, 且  $P_{k,n}^m = \alpha_{k,n}^m P_k^m$ ,  $\alpha_{k,n}^m$  为 PA 因子,  $P_k^m$  为  $S_k^m$  的总发射功率, 且  $P_k^m = P_V / |K|$ ,  $P_V$  为一个 VLC AP 总发射功率;  $\gamma$  为 LED 到 PD 的光-电-光转换系数.

根据香农公式, 则 UE  $n$  的可达速率为<sup>[14]</sup>

$$R_{k,n}^m = B \log_2(1 + \Gamma_{k,n}^m) \quad (3)$$

使用 MOS 值衡量 QoE 和 UE  $n$  可达速率<sup>[15]</sup>

$$\text{MOS}_{k,n}^m = \begin{cases} 1.0, & R_{k,n}^m \leq R_n^{1.0} \\ w_n \log_2\left(\frac{R_{k,n}^m}{b_n}\right), & R_n^{1.0} < R_{k,n}^m < R_n^{4.5} \\ 4.5, & R_{k,n}^m \geq R_n^{4.5} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $R_n^{1.0}$  和  $R_n^{4.5}$  分别为 UE  $n$  接收数据所需最小速率和推荐速率;  $w_n = 3.5 / \log_2(R_n^{4.5} / R_n^{1.0})$  和  $b_n = R_n^{1.0} (R_n^{1.0} / R_n^{4.5})^{-3.5}$ .

基于 CoMP 的 UE 总 MOS 最大化的优化目标为

$$\begin{aligned} & \max_{\{\mu, \alpha\}} \sum_{n=1}^{|M|} \text{MOS}_n(R_n) \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \sum_{n=1}^{|S_k^m|} \mu_{k,n}^m \alpha_{k,n}^m = 1, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall n \in N \\ & \text{C2: } \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{k=1}^{|K|} \mu_{k,n}^m = G, \forall n \in N \\ & \text{C3: } \text{MOS}_{k,n}^m \geq \text{MOS}_{\text{thr}} \quad \forall n \in N \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\mu$  为 UE  $n$  和 VLC AP 的关联矩阵;  $\alpha$  为 VLC AP 给用户的 PA 因子向量; C1 是 NOMA 用户组的总 PA 因子约束; C2 表示 UE 最多只能关联  $G$  个 AP; C3 是 QoE 阈值约束,  $\text{MOS}_{\text{thr}}$  为 QoE 阈值.

### 3 协作多 AP 用户接入与 NOMA 组内 PA

式(5)描述的目标为混合整数非线性规划问题, 难

以获得最优解<sup>[15]</sup>. 为此, 将 CoMP NOMA 资源分配解耦为用户接入和 PA 两个子问题, 分别求用户与 VLC AP 间关联矩阵  $\mu$  和 VLC AP 的 PA 因子向量  $\alpha$ .

#### 3.1 基于 QoE 和多 AP 协作接入(UA-UEQCM)

当 UE  $n$  接入  $S_k^m$  时, 应保证  $\text{MOS}_{k,n}^m \geq \text{MOS}_{\text{thr}}$ , 由式(2)推导所需最小发射功率为  $P_{k,n}^{m-\min}$ , 则 NOMA 组  $S_k^m$  的剩余功率为

$$P_k^{m-\text{rem}} = P_k^m - \sum_{n=1}^{|S_k^m|} P_{k,n}^{m-\min} \quad (6)$$

不能加入 VLC AP  $m$  的 NOMA 组的 UE  $n$  成为 CoMP UE. 为衡量 CoMP UE 加入 NOMA 组对组内其他 non-CoMP UE 的影响, 定义 NOMA 用户组  $S_k^m$  总影响和效用函数分别为

$$D1_k^m = \sum_{n=1}^{|S_k^m|} \text{MOS}_{k,n}^m \Big|_{\text{UE } n \in S_k^m} - \sum_{n=1}^{|S_k^m|} \text{MOS}_{k,n}^m \Big|_{\text{UE } n \notin S_k^m} \quad (7)$$

$$D2_k^m = \max \left\{ \text{MOS}_{k,j}^m \Big|_{\text{UE } n \in S_k^m} - \text{MOS}_{k,j}^m \Big|_{\text{UE } n \notin S_k^m} \right\}, \forall \text{UE } j \in S_k^m \quad (8)$$

其中, 式(7)表示 UE  $n$  加入  $S_k^m$ , 对  $S_k^m$  内所有 UE 的总 MOS 值影响; 式(8)表示 UE  $n$  加入  $S_k^m$ , 对  $S_k^m$  中其他 UE 影响的最大 MOS 差值, 并作为  $S_k^m$  的效用函数.

所提 UA-UEQCM 算法步骤如算法 1 所示.

#### 3.2 基于改进教与学优化的功率分配(PA-ITL)

在确定 UE 与 VLC AP 关联后, 采用改进教与学方法优化 NOMA 组内的  $\alpha_{k,n}^m$ , 以满足 UE 的 QoE 需求. 将 CoMP NOMA 集群内的 PA 解耦为 NOMA 用户组内的 PA 因子分配. 因此, 式(5)可改写为

$$\max_{\{\alpha_k^m\}} \sum_{n=1}^{|S_k^m|} \text{MOS}_{k,n}^m \quad \text{s.t. } \text{C1, C2, C3} \quad (9)$$

其中,  $\alpha_k^m = [\alpha_{k,1}^m, \alpha_{k,2}^m, \dots, \alpha_{k,|S_k^m|}^m]$  为  $S_k^m$  内各 UE 的 PA 因子向量, SIC 解码要求  $\alpha_{k,1}^m > \alpha_{k,2}^m > \dots > \alpha_{k,|S_k^m|}^m$ .

设  $L_{\text{pop}}$  为  $\alpha_k^m$  的候选解数目,  $\mathbf{a}_l$  表示  $\alpha_k^m$  的第  $l$  组候选解. 设种群第  $i$  轮迭代的适应度函数为

$$f_l^i = \sum_{n=1}^{|S_k^m|} \text{MOS}_{k,n}^m \quad (10)$$

在改进教与学方法中, UE 表示学生, 学生向老师和其他同学学习以提高 MOS 值.  $S_k^m$  表示学习组, 将学生分到  $T$  个学习组,  $T$  值由 VLC AP  $m$  的 NOMA 组数决定; 由式(4)计算 MOS 值最大的  $T$  个学生为组长, 剩余学生随机分到  $T$  个学习小组.

选择适应度函数值最大的组为最优小组  $t^*$ , 即

$$t^* = \arg \max_l (f_l^i) \quad (11)$$

则种群第  $i$  轮迭代最优 PA 因子向量为  $\mathbf{a}_{\text{best}} = \mathbf{a}_{t^*}^i$ .

学习成绩较好的学生, 倾向于向老师学习提高 MOS 成绩; 而学习成绩较差的学生, 倾向于向组长学

**算法 1** UA-UEQCM 算法

输入: UE 集合  $N$ , VLC AP 集合  $M$ , 各 VLC AP 资源块集合  $K, P_i$  和  $B$  值,

$\gamma$ , 各 UE 请求的最小需求速率和推荐速率值,  $MOS_{th}$ ,  $G$  值, 设  $n=1$ ,

$[\mu_{k,n}^m]=[0], k \in K, n \in N, m \in M$ , 设 CoMP 集合  $C=\emptyset$ ,  $\alpha_{k,n}^m = 1/|N|$ ;

输出: UE 接入 VLC AP 的 NOMA 组的接入关联矩阵  $\mu=[\mu_{k,n}^m]$ .

步骤 1: 由式(1), 计算各 UE  $n$  与各 VLC AP 的信道增益值;

步骤 2: 为 UE  $n$  协作多点  $G$  个 VLC AP, 按信道增益升序保存在  $X_n$  中;

步骤 3: 计算  $X_n$  中第 1 个 VLC AP  $m$  的各 NOMA 用户组的剩余功率,

按照剩余功率值升序排列 NOMA 用户组, 设  $k=1$ ;

步骤 4: 将 UE  $n$  加入资源块  $S_k^m$ , 计算  $S_k^m$  内 UE  $n$  所需的最小发射功率,

由式(6), 计算  $S_k^m$  的剩余功率值  $p_k^{m-rem}$ ;

步骤 5: 若  $p_k^{m-rem} \geq 0$ , 转步骤 6, 否则, 转步骤 7;

步骤 6: UE  $n$  加入  $S_k^m$ ,  $\mu_{k,n}^m = 1$ , 删除 VLC AP  $m$ , 转步骤 9;

步骤 7: 若  $k < |K|$ , 令  $k=k+1$ , 转步骤 4, 否则, 转步骤 8;

步骤 8: 从  $X_n$  中删除 VLC AP  $m$ , 若  $|X_n| > 0$ , 转步骤 3, 否则, 将 UE  $n$  加入

CoMP 用户集  $C$ , 令  $c=1, c \in C$ , 转步骤 10;

步骤 9: 由式(4), 计算 UE  $n$  的  $MOS_{k,n}^m$  值, 若  $MOS_{k,n}^m < MOS_{th}$ , 将 UE  $n$  加入

CoMP 用户集  $C$ , 转步骤 10;

步骤 10: 若  $n < |N|$ , 令  $n=n+1$ , 转步骤 1, 否则, 转步骤 11;

步骤 11: 设  $g_c=0$ , 从  $X_c$  找出 UE  $c$  候选 VLC AP 集合  $X_c$ ;

步骤 12: 计算  $X_c$  中信道增益最强的 VLC AP  $m$  的 NOMA 组的剩余功率,

按剩余功率升序排列 NOMA 用户组, 设  $k=1$ ;

步骤 13: 若  $|S_k^m| < 3$ , 且  $S_k^m$  内没有 CoMP UE, 且 UE  $c$  为 NOMA 组内信

道增益最小 UE, 转步骤 14, 否则, 转步骤 17;

步骤 14: 由式(7)和(8), 计算  $D1_k^m$  和  $D2_k^m$ , 若  $D1_k^m > 0$  且  $D2_k^m \leq 1$ , 转步骤

15, 否则, 转步骤 17;

步骤 15: 分配资源块  $S_k^m$  给 UE  $c$ , 令  $\mu_{k,n}^m = 1$ , 从  $X_c$  中删除 VLC AP  $m$ , 令

$g_c = g_c + 1$ , 转步骤 16;

步骤 16: 若  $|X_c| > 0$  且  $g_c < G$ , 转步骤 12, 否则, 转步骤 19;

步骤 17: 若  $k < |K|$ , 令  $k=k+1$ , 转步骤 13, 否则, 转步骤 18;

步骤 18: 从  $X_c$  中删除 VLC AP  $m$ , 若  $|X_c| > 0$ , 转步骤 12;

步骤 19: 若  $c < |C|$ , 令  $c=c+1$ , 转步骤 12, 否则, 转步骤 20;

步骤 20: 输出各 UE 关联 VLC AP 和 NOMA 组的关联矩阵  $\mu$ .

习. 则第  $t$  个 NOMA 组学生  $j$  的功率因子更新为

$$a_{t,j}^{i+1} = a_{t,j}^i + c_{t,j}^1 r_1 \left( \hat{a}_{t,*}^i - \bar{E}_t^i \right) + c_{t,j}^2 r_2 \left( \hat{a}_{t,out}^i - a_{t,j}^i \right) \quad (12)$$

其中,  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数;  $a_{t,j}^i$  为第  $t$  组第  $j$  学生在第  $i$  轮迭代中的功率因子,  $\hat{a}_{t,*}^i$  为  $\mathbf{a}_{best}$  的最优功率因子,  $\hat{a}_{t,out}^i$  表示  $t$  组中效用值  $D2_k^m$  最大的功率因子;  $\bar{E}_t^i$  为  $t$  组的学生平均成绩;  $c_{t,j}^1$  和  $c_{t,j}^2$  分别为  $t$  组中学生  $j$  向老师和自学的学习因子.

对所有学生更新功率因子后, 为扩大种群的多样性, 采用随机变异, 对每个学习小组中 MOS 值最低学生的功率因子用一个  $(0, 1)$  间随机数重置.

同时, 设学习小组之间相互学习概率为  $p$ . 若  $p \leq \varepsilon$ , 学生随机加入 1 个小组, 否则, 小组内所有学生向更优

秀的小组学习. 设优秀小组  $q$  成为小组  $t$  学习对象, 若功率因子增量值为  $\Delta a$ , 则  $\Delta a$  为

$$\Delta a = \hat{a}_{q,out}^i - \hat{a}_{t,out}^i \cdot f_q^i > f_t^i \quad (13)$$

其中,  $\hat{a}_{q,out}^i$  和  $f_q^i$  分别为第  $i$  轮迭代的小组  $q$  最优功率因子和适应度值; 自适应学习模式  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = t_{\max} / (t_{\max} + i) \quad (14)$$

其中,  $t_{\max}$  为最大迭代次数.

设小组  $q$  更优秀, 则在第  $i$  次迭代中, 小组  $t$  的 PA 因子向量更新为

$$\mathbf{a}_t^{i+1} = \mathbf{a}_t^i + \Delta \mathbf{a} \quad (15)$$

由式(7)计算更新前后的总影响值, 若其差值小于 MOS 阈值或迭代次数为  $t_{\max}$ , 算法结束, 确定当前  $\mathbf{a}_{best}$  为  $S_k^m$  功率因子向量; 否则, 进入下一轮迭代, 计算各组的新适应度函数值, 并更新  $\mathbf{a}_{best}$ .

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 仿真环境

论文使用蒙特卡洛法验证所提 UA-UEQCM 和 PA-ITL 算法的性能, 参数如表 1 所示. 在图 1 所示室内 VLC-NOMA 网络模型中, 房间为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ , 4 个 LED 作为 VLC AP 被布置在天花板上, 房间内随机分布 16 个 UE. 考虑 4 种数据业务, 其特性服从均匀分布, 其最小速率和对应的推荐速率分别为 5 Mbps、15 Mbps、25 Mbps、35 Mbps 和 15 Mbps、25 Mbps、35 Mbps、45 Mbps<sup>[7,15]</sup>.

表 1 VLC-NOMA 网络默认仿真参数

符号	参数	值	符号	参数	值
$P_v$	光发射功率	10 W	$A$	PD 接收面积	$1 \text{ cm}^2$
$B$	RB 带宽	20/3 MHz	$\gamma$	电-光-电系数	5.3
$ M $	AP 数目	4	$N_0$	噪声谱	$10^{-21} \text{ A}^2/\text{Hz}$
$\theta_{1/2}$	半功率角	$60^\circ$	$MOS_{th}$	MOS 阈值	2
$T(\phi)$	滤波器增益	1	$G$	UE 选 AP 数	3
$g(\phi)$	集中器增益	1	$t_{\max}$	迭代次数	200
$\psi_F$	PD 视场角	$60^\circ$	$L_{pop}$	功率因子	16
$ K $	RB 数目	3	$T$	小组数目	4

文献[7]所提的 UACGTDT 作为论文所提的 UA-UEQCM 的对比算法, 其 PA 使用所提 PA-ITL 算法; 教与学的功率分配 (Power Allocation based on Teaching and Learning, PA-TL)<sup>[15]</sup> 作为 PA-ITL 对比算法, 其用户接入使用 UA-UEQCM 算法.

### 4.2 仿真结果及分析

图 2 为所提 UA-UEQCM 和对比的 UACGTDT 都使用 PA-ITL 功率分配方法时获得总 MOS 值与 UE 数目间的关系, 其中, UACGTDT 中 UE 最多可以接入 2 个 VLC AP. 由图 2 可知, 随着 UE 数的增加, 2 种接入算法的总

MOS 都是先上升后趋于平稳,且所提 UA-UEQCM 优势越来越明显,当 UE 数目为 30 时,相比 UACGTD T, UA-UEQCM 在  $G=3$  时获得的 MOS 提升了 21.35%。这是因为 UACGTD T 没有考虑 VLC AP 间负载均衡和 PA 因子调整,限制了 MOS 值进一步提高,而 UA-UEQCM 在 UE 接入 VLC AP 时考虑了负载均衡和 UE 速率需求,当在  $G=2$  时,比 UACGTD T 算法获得更高的 MOS 值。此外,当  $G=1$  时,由于 UE 最多接入 1 个 VLC AP,所提算法的 MOS 最低,这也表明 CoMP 能提高 UE 的 QoE。

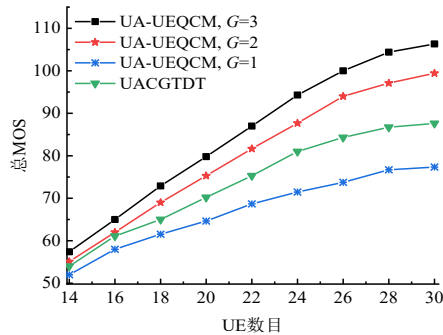


图2 总 MOS 与 UE 数目关系

图 3 为  $|N|=26$  时,所提 UA-UEQCM 和对比的 UACGTD T 在获得的总 MOS 与 PD 视场角的关系。当 FoV 增加时,UE 候选 VLC AP 数目随之增加,但是 ICI 同样增加,因此,UA-UEQCM 和 UACGTD T 获得的网络总 MOS 先上升后下降。当  $FoV=60^\circ$  时,相比 UACGTD T,所提 UA-UEQCM 获得的总 MOS 提升了 18.60%。原因是:UACGTD T 基于时分多址接入 UE 和分配正交的频谱资源,当 ICI 较大时,每个 UE 所分配的时隙和频谱块资源随之减少,当 FoV 超过  $60^\circ$  时,其 MOS 性能急剧下降;而所提 UA-UEQCM 在  $G>1$  时,能为 UE 协作接入多个 VLC AP,有效降低了 ICI,从而提高网络的 MOS 性能。

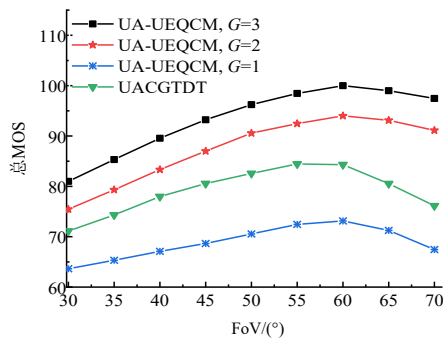


图3 总 MOS 与 FoV 关系( $|N|=26$ )

图 4 为 PA-ITL 和 PA-TL 都使用 UA-UEQCM 接入时的总 MOS 和 UE 数目间的关系。由于每个 VLC AP 总发射功率的限制,PA-ITL 和 PA-TL 的性能随 UE 数目的增加逐渐趋于平缓。当 UE 数目为 30 时,相比 PA-TL,所提

PA-ITL 的总 MOS 提高了 11.23%。原因是:所提 PA-ITL 在教学阶段增加组长引导学习;在种群重构阶段,在保留优质个体的同时,通过变异操作引入新的种群;在学习阶段,引入自适应学习模式,使 PA-ITL 实现了全局搜索与局部搜索间的平衡,获得更好的 MOS 性能。

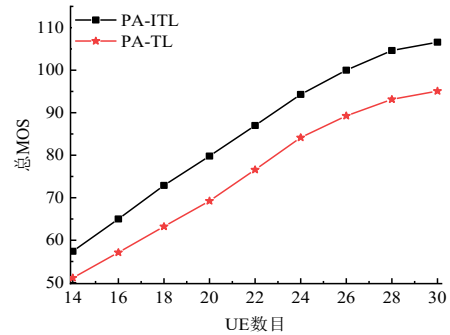


图4 不同 PA 的总 MOS 与 UE 数目关系

图 5 为  $|N|=26$  时,所提 PA-ITL 和 PA-TL 获得的 VLC-NOMA 总 MOS 和每个 VLC AP 光发射功率关系。随着 VLC AP 发射功率增加,小区间 ICI 也随之增加,因此 PA-ITL 和 PA-TL 的 MOS 性能逐渐趋于平缓,这也表明:VLC AP 增加发射功率并不一定能带来 MOS 性能的持续改善。当光发射功率为 14 W 时,相比 PA-TL,PA-ITL 的总 MOS 提高了 10.94%,原因是:所提 PA-ITL 在教与学过程中,学生通过向老师和小组长学习,并采用自适应学习模式和 PA 因子更新方法,有助于获得更好 MOS 性能。

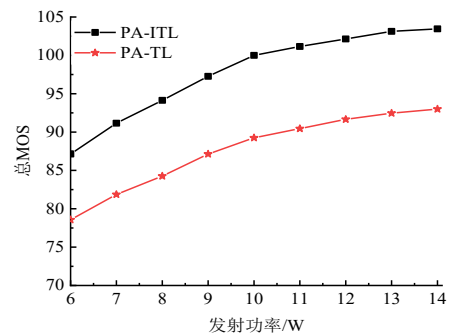


图5 不同 PA 的总 MOS 与光发射功率关系( $|N|=26$ )

## 5 结论

针对室内 VLC-NOMA 网络下行链路基于协作传输的用户接入和功率分配联合优化问题,论文设计了基于用户 QoE 和多个 VLC AP 协作的用户接入算法,以满足用户的 QoE 需求;同时,设计基于改进教与学方法优化 PA 因子,以提升 NOMA 组内功率的分配的 MOS 性能。

## 参考文献

- [1] 邬贺铨. 大模型融入云平台,信息化走向数智化[J]. 重庆

- 邮电大学学报, 2024, 36(1): 1-8.
- WU H Q. Integration of large-scale models and cloud, transition from informatization to digital intelligence[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2024, 36(1): 1-8. (in Chinese)
- [2] LIU H L, YANG S, CHEN Y, et al. Resource allocation based on differentiated user services for indoor hybrid multi-color VLC/WiFi networks[J]. Optics Communications, 2023, 530: 129072.
- [3] 刘期烈, 李子炎, 徐勇军, 等. 基于最大最小公平性的异构 VLC/RF 网络资源分配算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2022, 34(2): 269-276.
- LIU Q L, LI Z Y, XU Y J, et al. Max-min fairness-based resource allocation algorithm for heterogeneous VLC/RF networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022, 34(2): 269-276. (in Chinese)
- [4] 杨青青, 肖春娟, 彭艺. NOMA 残余干扰下 D2D 网络的能效资源分配算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2023, 35(4): 606-614.
- YANG Q Q, XIAO C J, PENG Y. Energy efficiency resource allocation algorithm for D2D networks with NOMA residual interference[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2023, 35(4): 606-614. (in Chinese)
- [5] ZHANG X K, GAO Q, GONG C, et al. User grouping and power allocation for NOMA visible light communication multi-cell networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(4): 777-780.
- [6] OBEED M, DAHROUJ H, SALHAB A M, et al. Power allocation and link selection for multicell cooperative NOMA hybrid VLC/RF systems[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(2): 560-564.
- [7] FENG S M, ZHANG R, XU W, et al. Multiple access design for ultra-dense VLC networks: Orthogonal vs non-orthogonal[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(3): 2218-2232.
- [8] MUHAMMED A J, MA Z, DING Z G, et al. Resource allocation for energy-efficient NOMA system in coordinated multi-point networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1577-1591.
- [9] 申滨, 蒋慧林, 董坤明. 非理想干扰消除全双工协作 NOMA 系统性能分析及功率分配[J]. 电子学报, 2024, 52(3): 792-802.
- SHEN B, JIANG H L, DONG K M. Performance analysis and power allocation of non-ideal interference cancellation full-duplex cooperative NOMA system[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(3): 792-802. (in Chinese)
- [10] BAO X, GU X X, ZHANG W C, et al. User-centric quality-of-experience optimization and scheduling of multicolor LEDs in VLC systems[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(3): 2275-2284.
- [11] 刘焕淋, 黄美娜, 陈勇, 等. 基于 NOMA 技术的 PLC-VLC 用户配对和子载波分配方法[J]. 电子学报, 2021, 49(10): 1952-1959.
- LIU H L, HUANG M N, CHEN Y, et al. User pairing and subcarrier allocation for PLC-VLC based on NOMA technology[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(10): 1952-1959. (in Chinese)
- [12] SUN Y, SHAO H, DU Z, et al. QoE-oriented resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(7): 2362-2365.
- [13] 陈勇, 张薇薇, 刘焕淋, 等. 室内 VLC-WiFi 异构网络中多色载波资源分配[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(5): 48-59.
- CHEN Y, ZHANG W W, LIU H L, et al. A method of multi-color carrier resource allocation for indoor VLC-WiFi heterogeneous network[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2024, 37(5): 48-59. (in Chinese)
- [14] GUO F Q, LU H C, JIANG X D, et al. QoS-aware user grouping strategy for downlink multi-cell NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(12): 7871-7887.
- [15] WANG K D, LIANG W, YUAN Y, et al. User clustering and power allocation for hybrid non-orthogonal multiple access systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 12052-12065.

#### 作者简介



刘焕淋 女, 1970年2月出生于重庆市. 重庆邮电大学教授、博士和硕士生导师. 主要研究方向为光通信技术和网络.  
E-mail: liuhl@cqpt.edu.cn



胡阳 男, 1999年10月出生于四川省威远县. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为光网络资源分配.  
E-mail: 1215827537@qq.com