

# 室内多输入多输出可见光通信系统接入点与功率分配优化

陈勇<sup>1\*</sup>, 吴金兰<sup>1\*\*</sup>, 刘焕淋<sup>2</sup>, 王创世<sup>1</sup>, 张薇薇<sup>1</sup>, 陈豪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065;

<sup>2</sup>重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

**摘要** 针对室内用户在非均匀分布时选择最高信号强度接入点(AP)导致系统总速率和用户服务质量较低的问题,提出联合AP和功率分配的方法。考虑多个LED作为AP的可见光通信(VLC)网络,根据用户分布设计了一个基于用户信道增益权重回溯(BM)的AP分配算法,使权重较低的用户接入到其他AP,降低资源竞争严重的LED上的用户负载;为了使所有用户均能满足通信需求,提出改进逐维动态正余弦算法(IDDSCA)的转换参数,并引入基于最优解方向的自适应搜索策略。利用IDDSCA动态调整每个AP下行链路的功率分配,同步优化系统总速率和用户服务质量。仿真结果表明,所提BM-IDDSCA方案相较于BM-DDSCA、SLCG-IDDSCA、BM- $\alpha$ PA、MT-PA与SLCG-QTPA方案在总速率方面分别提升2.94%、4.20%、2.03%、62.90%、4.89%。

**关键词** 可见光通信; 用户非均匀分布; 接入点分配; 服务质量; 功率分配; 逐维动态正余弦算法

中图分类号 TN915.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231477

## 1 引言

可见光通信(VLC)系统现用的商用LED的有限带宽限制了VLC系统的传输速率,很难满足多个用户数据速率的需求,此外,在只有单个VLC接入点(AP)的情况下,通过增大视场角(FOV)来改善低覆盖率的方式会进一步提高用户误码率<sup>[1-4]</sup>。因此,需要部署多个LED光源作为AP,采用多输入多输出(MIMO)技术以提供高通信速率<sup>[5]</sup>。

室内VLC系统中,由于用户数量的不断增多,网络可能会发生超载,使数据传输速率变慢,目前大多数研究主要通过AP分配<sup>[6]</sup>、频谱资源分配<sup>[7]</sup>、功率与子载波分配<sup>[8-10]</sup>、功率与时间分配<sup>[11]</sup>等对VLC系统进行优化。Shao等<sup>[12]</sup>提出在集中控制器上运行自适应算法,降低了切换停留时间,减少了数据丢失的风险,但是可能忽略了部分AP接入用户过多导致的通信中断问题。根据上述分析,考虑联合优化AP和功率分配来进一步提高系统总速率。

针对为用户分配AP问题,2019年,Obeed等<sup>[13]</sup>提出新的用户聚类算法和基于精确干扰信息分配功率的迭代算法,改善了用户能效,但用户可实现的通信速率可能会降低;2021年,Aboagye等<sup>[14]</sup>提出一种基于匹配

理论的AP分配算法,提高了用户体验质量,但没有考虑用户接收信号受其他信号干扰的情况;2022年,Yang等<sup>[15]</sup>设计了一种LED激活方案,将视距信道增益最强的LED分配给用户,但频繁的激活可能会影响照明质量;2023年,万子文等<sup>[16]</sup>假设室内用户分布范围固定,通过控制办公区域的AP向窃听者发送干扰信号,以提高系统总保密速率。

针对AP分配用户功率问题,2020年,Janjua等<sup>[17]</sup>在不考虑用户最低数据速率需求的情况下,分别采用按照分数分配功率和改进的幂律策略两种方案提高了用户平均数据速率;同年,Shahjalal等<sup>[18]</sup>设计了两级功率域的VLC系统,以提高AP的总速率,但AP密集分布导致用户需要频繁切换AP;2022年,Aboagye等<sup>[19]</sup>引入二次变换方法解决了用户信干噪比最大化的问题,但当LED接入用户较多时,该算法需要更高的发射功率才会快速收敛;同年,Tran等<sup>[20]</sup>在只有一个强用户和一个弱用户的情况下,使用基于函数迭代的一维搜索方法最大化提高了弱用户的数据速率。

为了提高室内用户非均匀分布时的系统总速率和用户服务质量,提出联合AP分配和功率分配的方案。首先,设计基于AP偏好权重顺序回溯的算法,以自适应搜索AP分配方案;然后,计算不同方案的系统性能,

收稿日期: 2023-08-25; 修回日期: 2023-09-30; 录用日期: 2023-10-27; 网络首发日期: 2023-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(51977021)、重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-MSX0734)、重庆市研究生科研创新项目(CYS22483)

通信作者: \*chenyong@cqupt.edu.cn; \*\*1772559580@qq.com

选择能最大化系统总速率的最优 AP 分配方案;最后,为了使 AP 内的用户能够通信稳定,通过改进逐维动态正余弦算法(IDDSCA)对用户重新进行功率分配,在提高系统总速率的同时满足 AP 内用户的通信需求。

## 2 用户侧与网络侧协作控制 VLC 系统模型

图 1 为一个室内 VLC 系统模型,将室内用户活动区域划分为办公区域和非办公区域,设置了  $N$  个 LED 作为 VLC AP,为用户提供通信服务,分别有  $N_B$  个和  $(N - N_B)$  个 AP 位于办公区域和非办公区域的正上方。利用一个集中控制器(centralized controller)收集用户信道信息和 APs 连接状态信息,起到控制 VLC APs 分配和功率分配的作用。此外,VLC APs 和用户集分别表示为  $N_{AP} = \{j, 1 \leq j \leq N\}$  和  $M_{user} = \{k, 1 \leq k \leq M\}$ 。VLC APs 定期同时向用户发送 VLC 测试信号,用户主动对 VLC 系统进行性能评估和信道估计<sup>[21]</sup>,并将测试结果与自身服务需求反馈给集中控制器,集中控制器根据可用信息设计 AP 分配方案,并调整每个 AP 的功率分配。APs 作为发射端使用非正交多址(NOMA)技术,通过不同的功率水平对多个用户的信号进行编码。在接收端,通过串行干扰删除(SIC)技术对这些信号进行解码和分离。

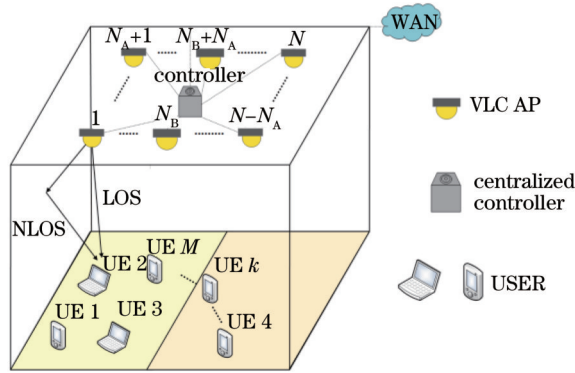


图 1 室内 VLC 系统模型

Fig. 1 Indoor VLC system model

在室内 VLC 系统模型中,AP 与用户接收端之间存在视距(LOS)链路和非视距(NLOS)链路。由于 NLOS 链路上的信号在传输过程中衰减严重,光电探测器(PD)

主要接收来自 AP 的 LOS 链路的信号功率,因此,只考虑 LOS 链路上的传输信号。假设在不存在遮挡时,第  $j$  个 AP 发射信号覆盖范围内第  $k$  个用户的信道增益为

$$h_{k,j} = \frac{(m+1)A_p}{2\pi d_{k,j}^2} \cos^m(\phi_{k,j}) \cos(\psi_{k,j}) g_{of} g_c(\psi_{k,j}), \quad (1)$$

式中:  $m = -\frac{1}{\log_2[\cos(\phi_{1/2})]}$  为朗伯系数;  $A_p$  为 PD 的

物理面积;  $d_{k,j}$  为第  $j$  个 AP 到第  $k$  个用户之间的距离;  $g_{of}$  为滤光片增益;  $\phi_{k,j}$  为辐照度角;  $\psi_{k,j}$  为入射角;  $g_c(\psi_{k,j})$  为光集中器增益,表示为

$$g_c(\psi_{k,j}) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\psi_{FOV})}, & \psi_{k,j} \leq \psi_{FOV} \\ 0, & \psi_{k,j} > \psi_{FOV} \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $\psi_{FOV}$  为 PD 的视场角,  $n$  为折射系数。

在发射端,将所有接入用户的信号均叠加在功率域中同时进行传输,从第  $j$  个 AP 发送到第  $k$  个用户的接收信号表示为

$$y_{k,j} = h_{k,j} \sum_{k=1}^M \gamma_{oe} \sqrt{p_{k,j}} x_{k,j} + n_{k,j}, \quad (3)$$

式中:  $x$  和  $p$  分别表示 AP 分配和用户功率分配的向量;  $\gamma_{oe}$  为光电转换系数;  $n_{k,j}$  表示均值为零、方差为  $\sigma_{k,j}^2$  的加性高斯白噪声。

## 3 联合 AP 和功率分配优化系统总速率

为了保证系统总速率最大化,设计了一种联合 AP 分配和功率分配的解决方案。通过建立用户对接入 AP 的偏好权重模型,并利用回溯搜索为用户分配 AP。此外,将系统功率分配问题拆分为单个 AP 内进行功率分配的子问题,实现单个 AP 内用户总速率最大化,然后结合所有 AP 内用户总速率进行下一步 AP 分配方案的搜索。用户选择最佳 AP 后,对用户重新分配功率,在满足所有用户通信需求的情况下进一步提高系统总速率。

### 3.1 系统总速率优化问题

室内 VLC 系统模型如图 1 所示,系统总速率是所有用户数据速率的总和。接收端利用 SIC 技术按照功率大小对接收信号进行解码,根据香农定理计算用户可实现速率<sup>[22-23]</sup>,表示为

$$R_{k,j} = \begin{cases} \frac{B}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{p_{k,j} (\gamma_{oe} x_{k,j} h_{k,j})^2}{\sum_{i=1}^{k-1} \epsilon p_{i,j} (\gamma_{oe} x_{i,j} h_{i,j})^2 + \sum_{i=k+1}^M p_{i,j} (\gamma_{oe} x_{i,j} h_{i,j})^2 + N_0 B} \right], & k=1, \dots, M-1 \\ \frac{B}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{p_{k,j} (\gamma_{oe} x_{k,j} h_{k,j})^2}{\sum_{i=1}^{k-1} \epsilon p_{i,j} (\gamma_{oe} x_{i,j} h_{i,j})^2 + N_0 B} \right], & k=M \end{cases}, \quad (4)$$

式中： $\varepsilon$ 为SIC的不完全解码系数； $N_0$ 为恒定的噪声功率谱密度； $B$ 为恒定的VLC带宽。所有用户接入VLC网络，系统总速率最大化问题可以表述为

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M x_{k,j} R_{k,j} \\ \text{s.t.} \quad & p_{k,j} \geq 0, k=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N \\ & x_{k,j} \in \{0, 1\}, k=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N \\ & \sum_{j=1}^N x_{k,j} = 1, k=1, 2, \dots, M \\ & \sum_{k=1}^M x_{k,j} p_{k,j} \leq P_{\max,j}, j=1, 2, \dots, N \\ & R_k > R_{\text{th}}, k=1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $p_{k,j} \geq 0$ 表示分配给用户的功率不为负数； $x_{k,j} \in \{0, 1\}$ 表示每个用户只能接入一个AP，如果第 $k$ 个用户接入第 $j$ 个AP，则 $x_{k,j} = 1$ ，否则 $x_{k,j} = 0$ ； $P_{\max,j}$ 为第 $j$ 个AP的最大发射功率； $R_{k,j}$ 表示第 $j$ 个AP为第 $k$ 个用户提供的可实现速率； $R_{\text{th}}$ 表示用户的数据速率需求。

### 3.2 AP分配方案设计

图2为室内用户呈现随机分布的场景，其中，AP1和AP2位于办公区域正上方，AP3和AP4位于非办公区域正上方。考虑到实际情况中用户主要活动在办公区域，因此室内用户通常处于非均匀分布状态。若仅按照信道增益大小来选择AP，可能导致一个AP连接多个用户，从而引发网络拥挤问题，同时，也可能出现有一些AP没有用户接入，或者存在只有一个AP的弱用户与该AP内的多个强用户竞争资源的情况。上述情况可能造成资源的浪费，也可能导致多个AP通信重叠区域内的用户丧失最优选择。

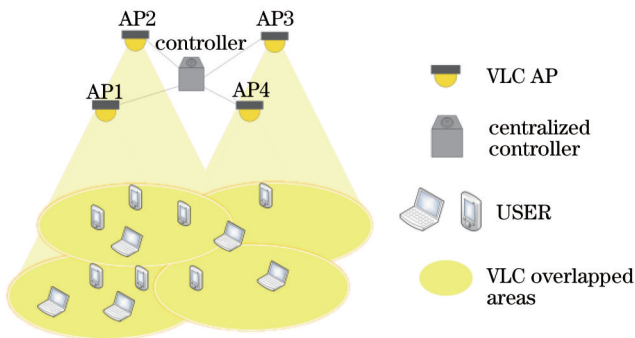


图2 室内用户随机分布

Fig. 2 Random distribution of indoor users

为了避免用户错过选择最优AP，根据用户的信道增益建立初始化方案，将信道增益进行加权归一化，并构建所有用户与可接入的AP的权重模型：

$$w_{k,j} = \frac{h_{k,j}}{\sum_{j=1}^N h_{k,j}}, j=1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

式中， $w_{k,j}$ 表示第 $k$ 个用户接入第 $j$ 个AP的信道增益权

重。如果存在第 $i$ 个弱用户只可以连接一个AP，其权重 $w_{i,j} = 1$ 。通过加权信道增益构建AP关联用户的候选列表 $\mathcal{L}$ ，AP会优先接入候选列表内信道增益权重较大的用户，保证其能够接入信道条件更好的AP。

为了进一步探索潜在AP分配方案，基于回溯法(BM)思想，将初始化AP分配方案表示为初始解空间，然后从初始解空间出发深度搜索解空间树。在搜索过程中，当达到一个解空间时，判断当前解空间的结果是否优于之前的解空间，如果当前解更优则将其作为新的节点，然后继续向下搜索，如果不是更优则回溯到上一个节点，并尝试重新搜索其他方向。最终，将搜索到的最优解空间作为最优AP分配方案。

定义1:第 $j$ 个AP将向它发送接入请求的 $m$ 个用户按照对应权重参数由高到低排列，构建“候选列表”，即 $w_{1,j} \geq w_{2,j} \geq \dots \geq w_{k,j} \geq \dots \geq w_{m,j}$ 。同时，用户将可接入的 $N$ 个AP按照对应权重参数由高到低排列，构建“偏好列表”，即 $w_{k,1} \geq \dots \geq w_{k,j} \geq \dots \geq w_{k,N}$ ，AP的权重参数越高则AP相对于用户的优先级越高。第 $j$ 个AP优先接受权重更高的用户申请，使不处于多个AP的通信重叠范围内的用户具有选择其唯一可接入AP的优先接入权。当出现不同用户具有同等信道增益权重时，比较AP $j$ 在不同用户偏好列表内的优先级，第 $j$ 个AP中拥有更高优先级所对应的用户将被优先接入，若第 $j$ 个AP拥有同等优先级，则第 $j$ 个AP优先接入信道增益更高的用户。

定义2:将用户选择AP问题表示为用户集合划分问题。将所有AP设为一个大集合 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ ，使大集合下的各子集 $A_j = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 之间的交集为空集。划分用户集合后，为了在探索最优AP分配方案的过程中实现更高的系统总速率，同时具有较低的算法复杂度，在AP分配阶段为用户分配功率，对此设计了功率分配系数 $\alpha_{k,j} = h_{k,j}^2 / \sum_{i=1}^m h_{i,j}^2$ 。在 $M$ 个用户均尝试了加入到 $N$ 个子集的情况下，其算法复杂度为 $O(NM)$ ，系统总速率为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^N R_{A_j} \quad (7)$$

定义3:集合 $M_{\text{user}}$ 内的所有用户与所有可加入的子集的偏好关系( $>_m$ )被定义为一个完整的、映射的关系，即 $\{A_j \subseteq N: u_k \in A_j\}$ 。加入子集 $A_j$ 表示接入了第 $j$ 个AP，没有接入任何用户的AP表示为空闲AP。如果出现不同AP同时接受用户接入申请，用户根据与AP之间的偏好关系来选择接入的AP。

当所有用户向可通信范围内的AP集合发出加入申请，各AP子集将根据候选列表依次接受用户加入。如果 $A_j$ 接入用户过多，出现用户的可实现速率低于阈值数据速率需求的情况，需要优先考虑将权重最低的用户以提高系统总速率为条件加入到其他AP子集。

计算用户接入至其他已接入用户更少的 AP 后的系统总速率  $R_{\text{nsum}}$ , 如果用户  $m$  在加入到集合  $A_l$  后, 系统总速率  $R_{\text{nsum}}$  不低于用户  $m$  还在集合  $A_j$  内时的系统总速率  $R_{\text{osum}}$ , 则  $A_l \succ_m A_j$ , 用户正式加入  $A_l$  的集合, 否则原来的集合  $A_j$  不能拒绝该用户。然后将信道增益权

重第二低到最低的所有用户重复以上步骤直至系统总速率增加或者 AP 内所有用户均尝试过申请加入其他 AP 子集。最后, 根据探索的最优 AP 分配方案, 将所有用户接入到对应 AP 内。上述过程可以表示为

$$A = \begin{cases} \{A_1, A_2, \dots, A_N\}, & \text{if } R_{\text{nsum}} < R_{\text{osum}} \\ \{A_1, A_2, \dots, A_j \setminus \{u_m\}, \dots, A_l \cup \{u_m\}, \dots, A_N\}, & \text{if } R_{\text{nsum}} \geq R_{\text{osum}} \end{cases} \quad (8)$$

上述算法的具体实现伪代码如表 1 所示。

表 1 优化用户接入 APs 的伪代码  
Table 1 Pseudocode for optimizing user access to APs

optimizing user access to APs
1. Input: $M, N, P_{\text{max}}, R_{\text{nsum}} = 0, R_{\text{osum}} = 0$ .
2. Initialize: Initialize user's candidate list $\mathcal{L}$ for AP according to Eq. (6). Initialize the AP assignment scheme to set $A$ .
3. Calculate the power coefficients $\alpha$ .
4. Calculate $R_{\text{osum}}$ according to Eq. (7).
5. Sort the APs in descending order based on the number of users connected, set $A_l = \{A_1, \dots, A_N\}$ .
6. for $j = 1, \dots, N$ do
7. Sort the users within $A_j$ in ascending order according to the channel gain weight value, set $A_j = \{u_1, \dots, u_m\}$ .
8. for $k = 1, \dots, m$ do
9. for $i = 1, \dots, N$ do
10. Add the $k$ -th user to the set of $A_{N+1-i}$ .
11. Calculate $R_{\text{nsum}}$ according to Eq. (7).
12. if $R_{\text{nsum}} > R_{\text{osum}}$ do
13. Update $A, A_l$ , set $R_{\text{osum}} = R_{\text{nsum}}$ .
14. end if
15. end for
16. end for
17. end for
18. Calculate the achievable rate for all users.
19. Output: $A$ .

此外, 为了在提升系统总速率的同时满足用户的通信需求, 需要评估用户在接入最优 AP 后的满意度。将所接入第  $k$  个用户的满意度表述为该用户的服务质量 (QoS)<sup>[24]</sup>, 表示为

$$Q_{k,j} = \begin{cases} \frac{R_{k,j}}{R_{\text{th}}}, & R_{k,j} < R_{\text{th}} \\ 1, & R_{k,j} \geq R_{\text{th}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, 服务质量为 1 表示用户已满足通信需求。由图 3 可以看出, 基于 BM- $\alpha$ PA 的功率分配方案无法满足所有用户的通信需求。因此, 需要提出新的功率分配方案为 AP 内的用户重新分配功率。

### 3.3 用户通信功率分配的优化

由于对用户的功率分配受 AP 最大发射功率的限制, 且在探索最优 AP 方案阶段使用的功率分配算法

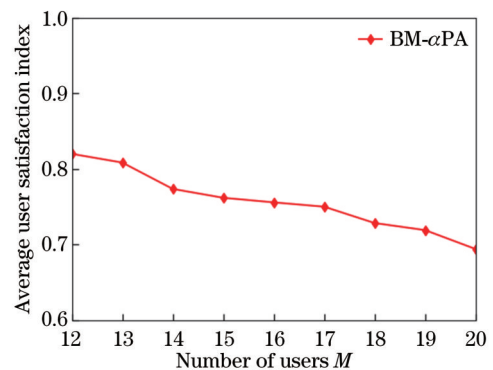


图 3 基于系数  $\alpha$  分配功率的平均用户满意指数  
Fig. 3 Average user satisfaction index of allocated power based on coefficient  $\alpha$

无法满足用户的通信需求,对此,需要重新对每个 AP 内的用户进行功率分配,从而在提高系统总速率的同时解决无法满足用户通信需求的问题,具体表示为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^m R_i \\ & \text{s.t. } p_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ & \sum_{i=1}^m p_i \leq P_{\max} \\ & R_i \geq R_{\text{th}}, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (10)$$

为了解决上述问题,提出了 IDSSCA,如表 2 所

示。传统的逐维动态正余弦算法(DDSCA)在初始迭代阶段容易陷入局部最优,随着迭代次数增加,收敛精度可能会降低<sup>[25]</sup>。为此,对 DDSCA 的转换参数进行了改进以提高算法收敛精度,同时为了避免算法陷入局部最优,在该算法中引入了功率分配的最优解方向自适应搜索策略,使搜索位置向最优位置自适应探索。其具体思路为:首先,算法会在解空间中随机生成  $m$  个个体  $X_j(j = 1, 2, \dots, m)$  的初始位置,每次迭代时进行逐维搜索,计算每维度中每个个体的适应度,并更新当前维度中个体的最优位置。具体表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{i,j}^{(t+1)} &= \mathbf{X}_{i,j}^{(t)} + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 \mathbf{P}_{i,j}^{(t)} - \mathbf{X}_{i,j}^{(t)}| + C(\mathbf{P}_{i,j}^{(t)} - \mathbf{X}_{i,j}^{*(t+1)}), r_4 \leq 0.5 \\ \mathbf{X}_{i,j}^{(t+1)} &= \mathbf{X}_{i,j}^{(t)} + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 \mathbf{P}_{i,j}^{(t)} - \mathbf{X}_{i,j}^{(t)}| + C(\mathbf{P}_{i,j}^{(t)} - \mathbf{X}_{i,j}^{*(t+1)}), r_4 > 0.5 \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{P}_{i,j}^{(t)}$  为第  $i$  维中第  $j$  个个体最优解的位置,  $t$  为当前迭代次数,  $\mathbf{X}_{i,j}^{(t)}$  为第  $j$  个个体在当前解中第  $i$  维的位置,  $\mathbf{X}_{i,j}^{*(t+1)}$  为粒子的下一个初步搜索位置,  $C$  为扰动系数,  $C(\mathbf{P}_{i,j}^{(t)} - \mathbf{X}_{i,j}^{*(t+1)})$  将初步搜索结果保留并向最优解位置继续探索,使用自适应更新的策略帮助算法跳出局部最优,从而避免算法于局部搜索状态时收敛,参数  $r_1$  指向下一个位置的移动方向,参数  $r_2 \in [0, 2\pi]$  表示向外移动的距离,参数  $r_3 \in [0, 2]$  表示目的地的随机权重,参数  $r_4$  将算法在探索 and 开发两个阶段之间随机切换。

为提高算法收敛精度,对转换参数  $r_1$  进行了改进,以减小更新步长,避免步长过大跳过最优点。改进表

示为

$$r_1 = a \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^{2.2}, \quad (12)$$

式中:  $a = 2$ ;  $t$  为当前迭代次数;  $T$  为最大迭代次数。当当前迭代次数大于最大迭代次数时,默认终止当前迭代的优化。如图 4(a) 所示,通过改进参数  $r_1$  提高了算法精度,使改进方案的性能比原方案更高,收敛速度更快。此外,通过最优解方向自适应搜索策略可以使算法的搜索位置向最优位置自适应探索,如图 4(b) 所示,在改进解的自适应搜索方向后,算法搜索不会局限于当前解的位置限制,而是能够往全局最优的方向探索。

表 2 IDSSCA 的伪代码

Table 2 Pseudocode for IDSSCA

IDSSCA
1. Input: $A$ , $fitness = 0$ , $Dest\_score = +\infty$ .
2. Initialize: Initialize the particle position $X_j(j = 1, 2, \dots, m)$ , select the current best position $P_j^{(t)}$ .
3. for $r = 1, \dots, N$ do
4. while $t < Max\_iter$ do
5. for $i = 1, \dots, n$ do
6. for $j = 1, \dots, dim$ do
7. Update $r_4$ , $r_2$ , $r_3$ , update $r_1$ according to Eq. (12).
8. Update the position of current particle new $X_{i,j+1}^{(t+1)}$ according to Eq. (11).
9. if $fitness < Dest\_score$ do
10. $Dest\_score = fitness$ .
11. Update the current best position $P_{i,j}^{(t+1)}$ .
12. end if
13. end for
14. end for
15. end while
16. end for
17. Calculate the sum system rate $R_{\text{nsun}}$ .
18. Output: $R_{\text{nsun}}$ .

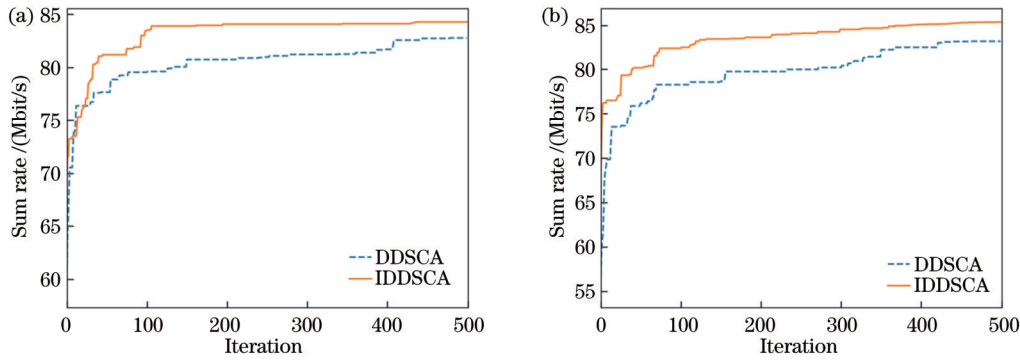


图 4 AP 内用户利用 IDSSCA 与 DDSCA 分配功率的算法收敛度 ( $m=4$ )。(a) 改进参数  $r_1$ ；(b) 基于最优解方向自适应搜索策略的改进  
Fig. 4 Convergence of power allocation algorithms for users within an AP using IDSSCA and DDSCA ( $m=4$ ). (a) Improvement of the parameter  $r_1$ ; (b) improvement of adaptive search strategy based on optimal solution direction

## 4 实验分析

### 4.1 仿真环境

为了验证所提方案的性能,设置一个尺寸为  $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3\text{ m}$  的房间模型,该模型在天花板上布置了 4 个 LED 作为 VLC AP,LED 坐标设置为  $[2.00, 2.00]$ 、 $[2.00, 4.00]$ 、 $[4.00, 4.00]$ 、 $[4.00, 2.00]$ 。其中,前两个 LED 位于办公区域,后两个 LED 位于非办公区域。设置办公区域的用户数量多于非办公区域,共有  $M$  个用户随机分布在室内,接收端的高度设置为  $0.85\text{ m}$ 。

为了评估所提出的 AP 分配方案效果,采用了传统的基于最强 LOS 信道增益 (SLCG) 的 AP 分配算法,结合所提改进功率分配算法,形成 SLCG-IDSSCA 方案,将其与 BM-IDSSCA 方案进行比较。同时,为了证明功率分配方案的改进效果,选择 BM- $\alpha$ PA、BM-DDSCA、MT-PA<sup>[14]</sup>和 SLCG-QTPA<sup>[19]</sup>作为对比方案。图 5 为随机生成的 20 个用户的位置,其他所涉及的仿真参数如表 3 所示。

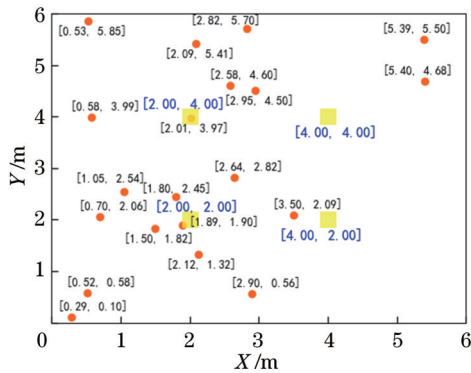


图 5 LED 位置与随机生成用户位置 ( $M=20, N=4$ )

Fig. 5 LED positions with randomly generated user positions ( $M=20, N=4$ )

### 4.2 实验设计

#### 4.2.1 不同假设环境的系统总速率优化

如图 6 所示:当用户数量为 20 时,与 BM-

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameter

Physical meaning	Parameter	Value
Number of LED	$N$	4
FOV of PD / ( $^\circ$ )	$\psi_{\text{FOV}}$	60
Area of PD / $\text{cm}^2$	$A_p$	1
Responsivity of PD / (A/W)	$\gamma_{\text{oe}}$	0.53
LED semi-angle at half-power / ( $^\circ$ )	$\phi_{1/2}$	60
Noise power spectral density / ( $\text{A}^2/\text{Hz}$ )	$N_0$	$10^{-21}$
AP signal bandwidth / MHz	$B$	40
Average required data rate / (Mbit/s)	$R_{\text{th}}$	4
Average emitted optical power per LED / W	$P_{\text{max}}$	10
Gain of optical filter	$g_{\text{of}}$	1
Refractive index	$n$	1
Residual interference fraction	$\epsilon$	0.1

DDSCA、SLCG-IDSSCA 和 BM- $\alpha$ PA 相比,所提 BM-IDSSCA 方案的系统总速率分别提升了 2.94%、4.20% 和 2.03%;与 MT-PA 和 SLCG-QTPA 相比, BM-IDSSCA 在系统总速率方面分别提升了 62.90% 和 4.89%。这是因为在 MT-PA 方案中,用户可能会被最优 AP 拒绝接入,从而难以获得最优选择;在 SLCG-QTPA 方案中,用户优先选择视距链路信道增益最高的 AP,可能会造成部分 AP 接入用户过多,用户能分配的功率减少,同时受到更多的干扰。相比之下, BM 方案联合了信道增益权重,将信道增益权重低于 1 的边缘用户接入其他通信用户较少的 AP 内,减少了接入用户过多的 AP 内用户间的干扰,提高了系统总速率。上述结果表明,所提 BM-IDSSCA 在 AP 分配和功率分配方面有所改进。

为了选择接收器的最优 FOV,图 7 分析了不同 FOV 下所有方案达到的系统总速率。当接收端 FOV 为  $40^\circ$  时,位于房间角落的用户可能无法接入 AP,导致基于 SLCG 的方案系统总速率降低;由于基于 BM 和 MT 的方案具有自适应分配 AP 的性能,可以将用

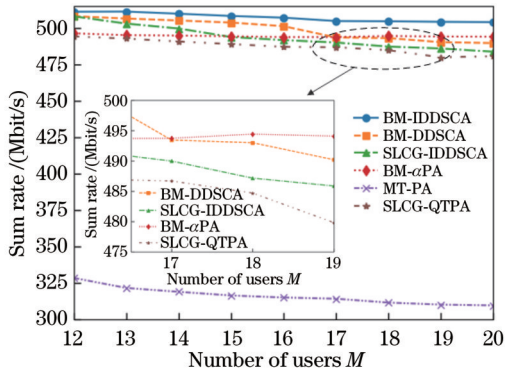


图 6 随着用户数量的变化不同分配方案的系统总速率  
Fig. 6 System sum rates of different allocation schemes varies with the number of users

户接入其他 AP 来缓解 AP 内用户数量较多时的干扰问题,因此当 FOV 增大时系统总速率会提高。当 FOV 为  $50^\circ$  时,用户均可以接入 AP,这提高了基于 SLCG 的方案系统总速率。然而,对于基于 BM 和 MT 的方案来说,新用户的加入会出现更多的信号干扰,并降低用户的平均可分配功率。随着 FOV 逐渐增大,信道增益变小,由于 MT-PA 通过 AP 内所有可接入用户的可实现速率来选择是否接入 AP,而 SLCG-QTPA 和 SLCG-IDDSCA 只接入信道增益最强的 AP,因此,MT-PA 方案的系统速率会随 FOV 增大而下降。相比于以上方案,随着 FOV 增大,BM 方案可以通过为用户接入其他 AP 缓解接入用户过多的 AP 内用户间的干扰,提高系统总速率。因此,基于 BM 的方案的性能要优于其他方案。

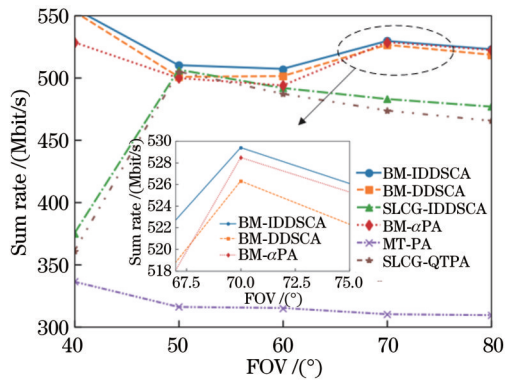


图 7 系统总速率与 FOV 的关系 ( $M=16$ )  
Fig. 7 Relationship between system sum rate and FOV ( $M=16$ )

图 8 显示了 LED AP 的最大发射功率对系统性能的影响。仿真表明,当 AP 发射功率从 6 W 增加到 20 W 时, BM-IDDSCA、BM-DDSCA、SLCG-IDDSCA、BM- $\alpha$ PA、MT-PA 和 SLCG-QTPA 的系统总速率分别增大了 15.62%、15.28%、15.46%、15.55%、14.19% 和 15.30%。上述结果表明,增加 AP 的发射功率可以提高系统的性能。

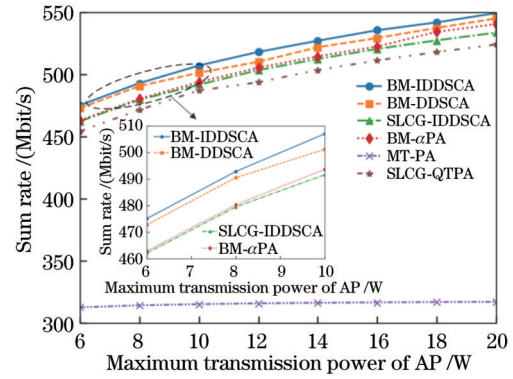


图 8 AP 的最大发射功率对系统总速率的影响 ( $M=16$ )  
Fig. 8 Effect of maximum transmission power of AP on system sum rate ( $M=16$ )

#### 4.2.2 用户满意度分析

为了评估室内多用户通信时的用户满意度,将计算的  $M$  个用户服务质量的平均值作为平均用户满意指数<sup>[24]</sup>,表示为

$$Q_{\text{average}} = \frac{\sum_k^M Q_k}{M}, k = 1, 2, \dots, M. \quad (13)$$

从图 9 可以看出,基于 IDDSCA、DDSCA 的方案以及 MT-PA 方案的平均用户满意指数优于 BM- $\alpha$ PA 和 SLCG-QTPA 方案。由于采用在满足用户通信需求的前提下对用户总速率最大化的功率分配机制,当用户数分别为 12、16 和 20 时,与 BM- $\alpha$ PA 和 SLCG-QTPA 方案相比,所提方案的平均用户满意指数分别提高了 21.95% 和 85.36%、32.31% 和 71.14% 以及 44.08% 和 82.13%。BM- $\alpha$ PA 方案通过为强用户分配更高的功率来实现更大的系统总速率,因此分配给弱用户的功率减少,可实现速率降低,且随着用户数量的增加,用户之间干扰也增加,从而降低了用户满意度;而 SLCG-QTPA 方案主要通过最大化所有用户的信干噪比(SINR)来提高系统总速率,然而,在接入用户较多的 AP 内为每个用户实现 SINR 最大化时所需的总功率超出了 AP 发射功率限制,导致一部分用户受到为优先级较高的用户实现最大 SINR 的影响,从而无法达到可实现速率阈值。

图 10 分析了平均用户满意指数与不同 FOV 的关系。当 FOV 为  $40^\circ$  时,有的用户可能无法与任何 AP 进行通信,导致最小的用户速率可能为 0,因此平均用户满意指数较低。随着 FOV 的增大,通信覆盖率提高,用户可选择接入更多 AP。BM- $\alpha$ PA 方案可通过 AP 分配均衡 AP 与用户之间的连接分布,从而提高用户数据速率,平均用户满意指数随之升高。但 FOV 进一步增大则会降低 SINR,导致平均用户满意指数随之下降。SLCG-QTPA 的目标是通过功率分配提高用户 SINR,从而降低 FOV 增大对 SINR 的影响。由图 9 和图 10 可知,在用户满意度方面,BM-IDDSCA、BM-

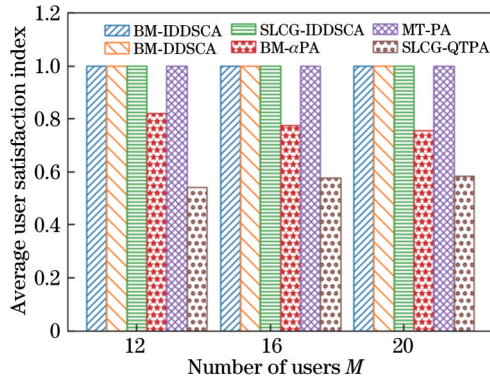


图9 随着用户数量的变化不同分配方案的平均用户满意指数  
Fig. 9 Average user satisfaction index of different allocation schemes varies with the number of users

DDSCA 和 SLCG-IDDSCA 方案相对于 BM- $\alpha$ PA 和 SLCG-QTPA 方案,在平均用户满意指数方面表现出了明显的改善,证明了所提功率分配算法可以提高用户通信质量。

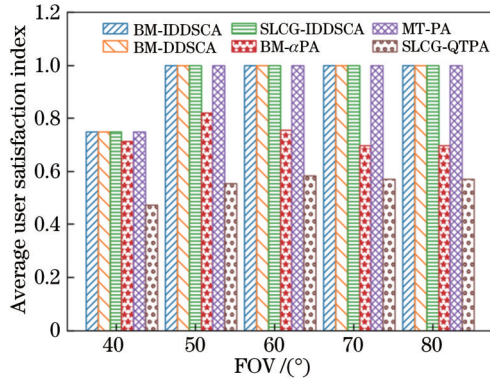


图10 平均用户满意指数与 FOV 的关系 ( $M=16$ )  
Fig. 10 Relationship between average user satisfaction index and FOV ( $M=16$ )

### 4.3 算法复杂度分析

假设 IDDSCA 和 DDSCA 迭代的最大次数和搜索次数为  $I$  和  $b$ ,种群数量为 AP 内用户的数量  $m$ ,计算系统总速率为  $O(Ibm_1 + \dots + Ibm_N)$ ,由于所有 AP 内的用户数量等于室内所有用户的数量,执行所提功率分配算法的计算复杂度可表示为  $O(IbM)$ 。基于 BM 的 AP 分配算法复杂度为  $O(NM)$ ,则 BM-IDDSCA 方案的复杂度为  $O[M(Ib + N)]$ 。用于对比的 BM-DDSCA、SLCG-IDDSCA、BM- $\alpha$ PA、MT-PA 和 SLCG-QTPA 方案的复杂度为  $O[M(Ib + N)]$ 、 $O(IbM + M)$ 、 $O(NM)$ 、 $O(NM + M)$  和  $O(\beta M^2 + M)$ ,其中,  $\beta$  表示 SLCG-QTPA 方案的最大迭代次数。

## 5 结 论

研究了在室内用户非均匀分布的 MIMO VLC 系统中最大化系统总速率和改善用户服务质量的问题,

提出了基于信道增益权重模型回溯的 AP 分配算法;为了在提高系统总速率的同时保证用户的通信需求,需要在用户接入 AP 后为用户分配能使其达到可实现速率阈值的功率,因此提出了 IDDSCA 对用户进行功率分配。分析了所提方案在各种环境假设下的系统总速率和用户满意度,仿真结果表明,用户越多,所提 AP 分配方案的改进效果越好,同时改进后的功率分配方案能有效提高用户满意度。

### 参 考 文 献

- [1] 张琦, 岳殿武. 室内 MIMO ACO-OFDM 可见光通信系统接收机设计[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0106001.  
Zhang Q, Yue D W. Design of indoor receiver using multiple-input and multiple-output ACO-OFDM visible light communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0106001.
- [2] Deng J J, Jin X Q, Ma X T, et al. Graph-based multi-user scheduling for indoor cooperative visible light transmission[J]. Optics Express, 2020, 28(11): 15984-16002.
- [3] Jenila C, Jeyachitra R K. Green indoor optical wireless communication systems: pathway towards pervasive deployment [J]. Digital Communications and Networks, 2021, 7(3): 410-444.
- [4] 雷新颖, 王成. 一种多孔径接收器的设计及其可见光通信系统 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 59-66.  
Lei X Y, Wang C. Design of a multiple bore diameter receiver and its visible communication system[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(1): 59-66.
- [5] 高俊英, 王德昌, 姚建国. 基于摄像头的 MIMO 可见光无线通信系统[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106004.  
Gao J Y, Wang D C, Yao J G. MIMO visible light wireless communication system employed camera-based receiver[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106004.
- [6] Kim B W. Suboptimal LED selection for distributed MIMO visible light communications[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2018, 22(1): 105-110.
- [7] 白向伟, 李青, 唐燕群. 低复杂度室内超密集可见光通信网络频谱资源分配算法[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0906007.  
Bai X W, Li Q, Tang Y Q. Low-complexity spectrum resource allocation algorithm for indoor ultra-dense visible light communication networks[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0906007.
- [8] Chen J N, Luo S Y, Zhang L, et al. iPAS: a deep Monte Carlo Tree Search-based intelligent pilot-power allocation scheme for massive MIMO system[J]. Digital Communications and Networks, 2021, 7(3): 362-372.
- [9] Wang G Y, Shao Y J, Chen L K, et al. Improved joint subcarrier and power allocation to enhance the throughputs and user fairness in indoor OFDM-NOMA VLC systems[J]. Optics Express, 2021, 29(18): 29242-29256.
- [10] 谢显中, 高龙龙, 卢华兵. VLC 网络中兼顾 QoS 和公平性的协作子载波与功率分配算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 7-17.  
Xie X Z, Gao L L, Lu H B. Coordinated subcarrier and power allocation algorithms considering both QoS and fairness for VLC networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(1): 7-17.
- [11] 辛雅楠, 刘期烈, 刘倩, 等. 基于有界信道状态信息不确定性的异构 VLC/RF 网络鲁棒能效资源分配算法[J]. 中国激光, 2022, 49(23): 2306003.  
Xin Y N, Liu Q L, Liu Q, et al. Robust energy-efficient resource allocation algorithm for heterogeneous VLC/RF



- networks based on bounded channel state information uncertainty [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 138-146.
- [12] Shao S H, Liu G X, Khreishah A, et al. Optimizing handover parameters by Q-learning for heterogeneous radio-optical networks[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 12(1): 7900615.
- [13] Obeed M, Salhab A M, Zummo S A, et al. New algorithms for energy-efficient VLC networks with user-centric cell formation [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2019, 3(1): 108-121.
- [14] Aboagye S, Ngatched T M N, Dobre O A, et al. Joint access point assignment and power allocation in multi-tier hybrid RF/VLC HetNets[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10): 6329-6342.
- [15] Yang Y, Yang Y J, Chen M Z, et al. Joint LED selection and precoding optimization for multiple-user multiple-cell VLC systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 6003-6017.
- [16] 万子文, 吴雅婷, 梁如斌, 等. 基于联合干扰的室内可见光通信安全系统[J]. 光学学报, 2023, 43(4): 0406002.  
Wan Z W, Wu Y T, Liang R B, et al. Indoor visible light communication security systems based on cooperative jamming [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(4): 0406002.
- [17] Janjua M B, da Costa D B, Arslan H. User pairing and power allocation strategies for 3D VLC-NOMA systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 866-870.
- [18] Shahjalal M, Hasan M K, Islam M M, et al. A two-stage power allocation-based NOMA architecture for optical camera communication[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15(3): 4421-4430.
- [19] Aboagye S, Ngatched T M N, Dobre O A. Subchannel and power allocation in downlink VLC under different system configurations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 3179-3191.
- [20] Tran G N, Kim S. Performance evaluation of short packet communications in NOMA VLC systems with imperfect CSI[J]. IEEE Access, 2022, 10: 49781-49793.
- [21] 陈勇, 吴志倩, 刘焕淋, 等. 基于神经网络的可见光通信系统信道估计方法[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 0706004.  
Chen Y, Wu Z Q, Liu H L, et al. Neural-network-based channel estimation method for visible light communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(7): 0706004.
- [22] Wu G F, Zheng W Y, Xiong W, et al. A novel low-complexity power allocation algorithm based on the NOMA system in a low-speed environment[J]. Digital Communications and Networks, 2021, 7(4): 580-588.
- [23] Ryu W J, Kim J W, Kim D S. Resource allocation in downlink VLC-NOMA systems for factory automation scenario[J]. Sensors, 2022, 22(23): 9407.
- [24] Liu H L, Lin Z Y, Chen Y, et al. Elite user clustering-based indoor heterogeneous VLC interference management and sub-channel allocation strategy[J]. IEEE Access, 2020, 8: 43582-43591.
- [25] Li Y, Zhao Y R, Liu J S. Dynamic sine cosine algorithm for large-scale global optimization problems[J]. Expert Systems With Applications, 2021, 177: 114950.

## Optimization of Access Points and Power Allocation for Indoor Multi-Input and Multi-Output Visible Light Communication Systems

Chen Yong<sup>1\*</sup>, Wu Jinlan<sup>1\*\*</sup>, Liu Huanlin<sup>2</sup>, Wang Chuangshi<sup>1</sup>, Zhang Weiwei<sup>1</sup>, Chen Hao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Network Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

<sup>2</sup>School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

### Abstract

**Objective** Indoor visible light communication has been widely studied for its simultaneous illumination and secure communication functions. In practical indoor multiple-input and multiple-output (MIMO) visible light communication (VLC) environments, users usually concentrate their work in specific areas, resulting in a non-uniform user distribution. As the number of users increases, the way users tend to access to the nearest access point (AP) may overload some APs, a problem that has rarely been considered in most studies. In this paper, we introduce a backtracking AP assignment scheme using a channel gain weighting model, which aims to balance the distribution of connections between APs and users, thereby reducing the load on APs and increasing the system sum rate. However, the power allocation method using power allocation coefficients designed based on user channel gains cannot meet the communication needs of all users. At the same time, users are subject to interference from other users' signals during the communication process, which may affect the rate that users can achieve, depending on the amount of power allocated to other users' signals. Therefore, the scheme of power allocation by the dimension-by-dimension dynamic cosine algorithm (DDSCA) improved by the optimal parameters  $r_1$  combined with the optimal solution direction adaptive exploration strategy is adopted. It redistributes the user's power to solve the problem that each user's achievable rate is lower than the threshold value, which can improve the overall communication performance.

**Methods** The non-uniform distribution of indoor users in MIMO scenarios leads to poor user communication quality due

to accessing too many users at APs. To this end, we propose a joint AP assignment and power allocation scheme to improve the sum rate of data transmission in the system. A candidate list  $\mathcal{L}$  is constructed by generating the channel gain weight parameters of users and APs, and all APs are divided into subsets. The performance of the scheme is dynamically explored based on  $\mathcal{L}$  for users joining each AP subset. Power allocation coefficients are designed during the dynamic exploration of the AP allocation scheme, and the APs allocate the power to the users based on the power allocation coefficients. Then the AP allocation algorithm based on the channel gain weight model backtracking is adopted to balance the connection distribution between APs and users, and the centralized controller controls the APs to provide communication services for different users. In addition, after obtaining the optimal AP allocation scheme, the DDSCA is improved by designing the transformation parameters and the strategy of adaptive exploration in the direction of the optimal solution to satisfy the communication needs of all users.

**Results and Discussions** In the case of non-uniform distribution of indoor users (Fig. 5), the proposed scheme is compared with other schemes under different assumptions. The results show that the proposed scheme outperforms the other schemes in increasing the system sum rate with a larger number of users (Fig. 6). By introducing an improved DDSCA (IDDSCA) for power allocation, it can effectively improve user satisfaction index. In addition, IDDSCA enables all users to reach the achievable rate threshold (Fig. 9), which leads to an increase in the average user satisfaction index. The system sum rate (Fig. 7) and average user satisfaction indices (Fig. 10) are examined for users equipped with receivers having different field-of-view (FOV) angles. It is observed that a larger FOV angle can have a significant impact on the channel gain, resulting in a decrease in the system sum rate. However, the proposed solution effectively mitigates the impact of FOV on the system sum rate and user satisfaction index through dynamic APs and power allocation. In addition, we analyze the effect of the maximum transmit power of the AP on the system performance (Fig. 8), and as the AP transmit power increases from 6 W to 20 W, the proposed scheme increases the sum rate of the system by 15.62%, which shows that the higher transmit power can allow users to ensure stable communication while bringing a higher achievable rate.

**Conclusions** In this paper, we study the problem of maximizing the system sum rate and improving the user quality of service in MIMO VLC systems with non-uniformly distributed indoor users. We propose an AP allocation algorithm based on the backtracking of the channel gain weight model so that the user can select the AP that can improve the system sum rate. To improve the system sum rate while meeting the user's communication requirements, it is necessary to allocate the power to the user after the user accesses to the AP. We propose an IDDSCA, which allocates the power to the user to reach the achievable rate threshold. The analysis examines the system sum rate and user satisfaction of the proposed scheme under various environmental assumptions. Simulation results indicate that the improvement in the proposed AP allocation scheme becomes more pronounced as additional users are added, and the improved power allocation scheme can effectively increase user satisfaction.

**Key words** visible optical communication; user non-uniform distribution; access point allocation; quality of service; power allocation; dimension-by-dimension dynamic sine cosine algorithm