室内自由小区VLC协作的用户接入和功率动态调整方法

刘焕淋*[①] 杨 帅[①] 陈 勇[②] 黄美娜[①] 陈浩楠[②] 陈 科[①] 袁夕淋[①]

[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：针对室内自由小区VLC网络照明和吞吐量联合优化困难的问题，该文提出VLC协作用户接入和功率动态调整(VCUA-DPA)方法。在用户接入阶段，设计考虑网络的负载均衡、用户速率需求和协作小区数目限制的用户和VLC协作的用户接入算法；在功率分配阶段，设计联合优化照明均匀度和系统吞吐量的功率动态调整分配算法。仿真结果表明，所提VCUA-DPA在明显提升系统吞吐量的同时能优化室内照明均匀度。

关键词：室内自由小区 VLC网络；用户接入；功率分配；系统吞吐量；照明均匀度

中图分类号：TN929.11 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2023)12-4292-09

DOI: 10.11999/JEIT221297

Cooperative VLC User Access and Dynamic Power Adjustment in Indoor Cell-free VLC Network

LIU Huanlin[①] YANG Shuai[①] CHEN Yong[②] HUANG Meina[①]
CHEN Haonan[②] CHEN Ke[①] YUAN Xilin[①]

[①](*School of Communication 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: Focusing on the difficulty of jointly optimizing lighting and throughput in indoor cell-free Visible Light Communication (VLC) network, a method of VLC Cooperative User Access and Dynamic Power Adjustment (VCUA-DPA) is proposed. In the user access stage, by considering the network load balance, user rate demands and the limitation of the number of cooperative cells, a user access algorithm through user and VLC cooperating is designed in this paper. In the power allocation stage, a dynamic power adjustment algorithm is designed to optimize jointly illumination uniformity and system throughput. Simulation results show that the proposed VCUA-DPA can significantly improve the system throughput and optimize the indoor illumination uniformity.

Key words: Indoor cell-free VLC network; User access; Power allocation; System throughput; Illumination uniformity

1 引言

未来的6G网络将为陆、海、空、天、地等多种复杂场景提供高速数据互联服务，而无线通信的频谱资源难以满足飞速增长的带宽需求[1]。通信与照明深度耦合的可见光通信(Visible Light Communication, VLC)技术利用其丰富的光谱资源，可以有效地分担室内无线通信的数据流量，解决现有的无线频谱的短缺问题。相比于无线射频通信技术，VLC技术具有诸多优点，如抗电磁辐射干扰、超大带宽、绿色健康等[2]。因此，VLC将在6G网络中担任重要的角色[3]。

然而，单个VLC接入点(Access Point, AP)的通信覆盖范围较小，难以实现通信全覆盖，而多个VLC AP组网中小区边缘用户能接收到多个VLC AP发送的信号，小区间干扰导致小区边缘用户服务质量变差[4]。同时，用户设备(User Equipment,

收稿日期：2022-10-13；改回日期：2023-02-14；网络出版：2023-02-22
*通信作者： 刘焕淋 liuhl2@sina.com
基金项目：国家自然科学基金(51977021, 61275077)，重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-MSX0734)，重庆市研究生科研创新项目(CYS22483)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (51977021, 61275077), The Science Foundation Project of Chongqing Science and Technology Commission (CSTB2023NSCQ-MSX0734), The Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Chongqing (CYS22483)

UE)在移动时或者信道链路较差时在VLC AP之间频繁切换，影响用户的服务质量(Quality of Service, QoS)体验。为了解决上述问题，文献[5–7]提出了室内cell-free VLC的组网方式，同传统的小区通信相比，cell-free VLC网络取消小区划分，即VLC小区没有明确的小区边界；此外，UE可同时接收在视场角(Field of View, FoV)内多个VLC AP的协作服务，避免了UE在AP之间的频繁切换，还能提高边缘用户的服务质量。但是，VLC AP的密集部署、用户数目增加和用户位置的随机性影响小区的协作传输，使UE接入多AP策略和功率分配问题变得更加复杂。

针对用户接入VLC AP的问题，文献[8]提出在室内VLC异构网络中联合收、发端需求的用户接入算法，该算法采用万有引力理论折中用户与多个指标度量的AP匹配性能。文献[9]针对室内VLC网络设计基于QoS的AP关联(QoS-Driven AP Association, QDAA)方法，该方法均衡网络负载和用户速率需求，但是，采用单小区接入的QDAA导致用户的信干噪比(Signal to Interference Ratio, SINR)较低。文献[10]提出基于二部图的多用户对多VLC AP关联(Many-to-Many Association base on Bipartite Graph, MMABG)方法，该方法将用户与AP关联关系建模成多对多匹配模型，并根据设置的阈值控制协作VLC AP小区数目以提高系统吞吐量。基于上述文献分析，多小区接入方式有效地提高用户SINR，但是用户接入的小区数目过多，使VLC AP小区间干扰劣化，限制了系统吞吐量和资源利用率的提高。

针对功率分配问题，文献[6]提出用户连接VLC AP的时间分配和连续凸逼近的功率控制方法为关联VLC AP的用户分配时间和功率资源，以降低VLC AP小区间干扰(Inter Cell Interference, ICI)。文献[11]根据各个VLC AP中服务用户和干扰用户的信道增益比值，并对强干扰的VLC AP进行休眠处理，降低ICI，提高用户接入VLC AP的可达速率。文献[12]针对VLC异构网络提出基于残余干扰抑制的控制发射功率系数，通过降低VLC AP的无效发射功率，缓解ICI影响。文献[6,11,12]以系统吞吐量为优化目标优化VLC AP的发射率，忽略室内照明均匀度的要求。根据国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)照明标准，室内照明均匀度应高于最小照明均匀度阈值，满足人眼的视觉舒适性[13,14]；此外，照明不均匀可能使分布在房间内不同位置的用户难以享受到公平的服务质量，甚至导致通信中断。因此，有效的功率分配方法不仅需要考虑系统吞吐量，而且需兼顾VLC室内照明的质量。

文献[15]提出了改进遗传模拟退火算法优化发光二极管(Light Emitting Diode, LED)阵列的AP功率调节因子，提高了接收平面的照明均匀度，但是，该算法忽略了用户的通信需求。文献[16]分析了AP发射功率的优化对用户SINR和室内照明均匀度的影响，并提出了低复杂度的SINR优先方法(SINR First Approach, SFA)和照明均匀度优先方法(Uniformity First Approach, UFA)，SFA先为所有AP分配最大功率，再根据服务用户和干扰用户的距离比值，调整部分AP的发射功率，以降低ICI和提高系统吞吐量为目标；而UFA先采用二分法和凸优化方法求解照明均匀度的AP发射功率，再根据用户之间的距离，调整AP发射功率，以满足室内照明均匀度需求。随着用户数增加，用户之间距离变小，用户之间的干扰加重，导致用户的SINR和系统的吞吐量下降。

综上所述，本文提出联合优化照明和吞吐量的VLC协作用户接入和功率动态调整(VLC Cooperative User Access and Dynamic Power Adjustment, VCUA-DPA)方法。所提VCUA-DPA包括2部分：首先是考虑AP负载均衡、用户速率需求和协作小区数目约束，设计基于用户需求的VLC协作用户接入(VLC Cooperating User Access, VCUA)算法；然后，设计联合优化照明和吞吐量的AP动态功率调整(Dynamic Power Adjustment, DPA)算法，降低ICI，提高系统吞吐量和满足室内照明均匀度需求。

2　系统模型与问题建模

2.1　室内cell-free VLC网络的传输信道

室内cell-free VLC网络模型如图1所示。VLC APs部署在天花板上，负责室内照明和下行链路的

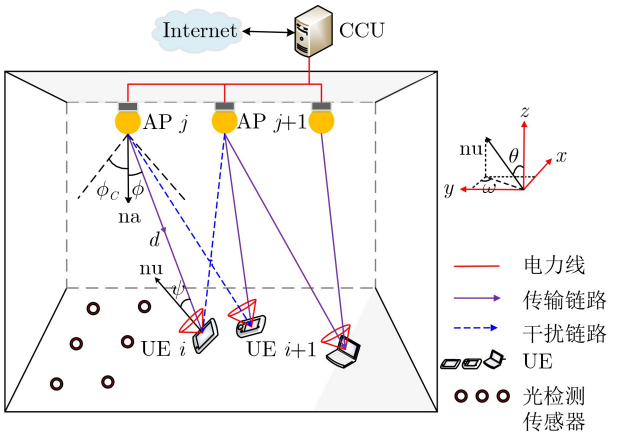

图 1 室内cell-free VLC网络模型

数据传输，VLC APs之间通过电力线连接到中央控制单元(Central Control Unit, CCU)，CCU负责收集用户请求、链路信息和执行VLC资源分配。设VLC APs集合和用户集合分别记为$N_{\mathrm{A}}=\{1,\ 2,\ \cdots,\ N\}$和$M_{\mathrm{U}}=\{1,\ 2,\ \cdots,\ M\}$。信号经过调制并驱动VLC APs发出光信号，再经过VLC信道到达随机分布在房间的用户，用户的PD将接收到的光信号转换为电信号，则输出电流信号为[9,10]

$$y_i=\gamma\sum_{j=1}^{N}P_j h_{i,j}x_{i,j}+n_i \tag{1}$$

式中，$x_{i,j}$为AP j传输到用户i的光信号；P_j为AP j发射功率；γ为PD光电转换效率；n_i为加性高斯白噪声；$h_{i,j}$为AP j到用户 i信道增益。本文仅考虑LED视距链路，则AP j到用户i信道增益为[9,10]

$$h_{i,j}=\begin{cases}\dfrac{(m+1)A_{\mathrm{PD}}}{2\pi d_{i,j}^2}\cos^m(\varphi)\cos(\psi),\ 0\le\psi\le\psi_c\\ 0,\qquad\qquad \psi>\psi_c\end{cases} \tag{2}$$

式中，A_{PD}为光接收面积；$d_{i,j}$为AP j与用户i的直线距离；朗伯辐射系数为$m=-\ln 2/\ln[\cos(\phi_{1/2})]$，$\phi_{1/2}$为VLC AP半功率角；VLC AP发射角为$\phi$；光接收机视场角为$\psi_c$；光接收机的入射角为$\psi$。

室内cell-free VLC网络采用多AP密集部署方式，存在重叠覆盖区域，位于重叠覆盖区域的多个用户复用相同频段，容易产生ICI。若AP j使用频段f为用户i提供服务，AP j+1也使用相同频段f为用户 i+1提供服务，且AP j在用户i+1的FoV内，则用户i和用户i+1存在同频干扰。为了降低干扰，本文采用协作传输方式，即每个用户选择接入在FoV内的多个AP，则用户i的SINR为

$$\eta_i=\frac{\sum\limits_{j\in N_i}a_{i,j}(\gamma h_{i,j}P_j)^2}{\sum\limits_{j\in N_i}(1-a_{i,j})(\gamma h_{i,j}P_j)^2+n_0B_i} \tag{3}$$

式中，若用户i接入AP j，接入因子$a_{i,j}=1$，否则，$a_{i,j}=0$；B_i为AP分配给用户的带宽；N_i为用户i的协作AP集合；n_0为加性高斯白噪声功率谱密度，室内取值为1×10^{-21} [12]。则用户i可达速率为[9,17]

$$R_i=B_i\log_2(1+\eta_i) \tag{4}$$

2.2 室内Cell-free VLC网络的照明指标

根据ISO规定，室内照明强度范围为300～1500 lx，且室内最小可接受照明均匀度应大于0.7[14]。由于LED光源按朗伯辐射模型向外发射光信号，则第s个接收平面接收点的水平照明强度为[9,16]

$$E_s=\sum_{j=1}^{N}\frac{P_j\times(m+1)\cos^m(\phi)\cos(\psi)}{2\pi d_{s,j}^2\delta} \tag{5}$$

式中，E_s为第s个接收平面接收点的水平照明强度，δ为LED的发射光功率和光通量的转换系数。

照明均匀度μ为最小照明强度与平均照明强度的比值[14,16]，式(6)中的S为接收平面接收点的数目。

$$\mu=\frac{\min\limits_{s}E_s}{\dfrac{1}{S}\sum\limits_{s=1}^{S}E_s} \tag{6}$$

2.3 室内cell-free VLC网络的照明和吞吐量问题模型

在室内Cell-free VLC网络中，联合优化照明和吞吐量的优化问题可表示为

$$\left.\begin{aligned}&\mathrm{O1}:\max_{\boldsymbol{A},P^l}\sum_{i=1}^{M}R_i\\&\mathrm{O2}:\max_{P^l}\mu\\&\text{s.t. C1}:R_i\ge D_i,\forall i\\&\quad\ \mathrm{C2}:E_{\min}\le E_s\le E_{\max},\forall s\\&\quad\ \mathrm{C3}:P_{\min}\le P_j\le P_{\max},\forall j\\&\quad\ \mathrm{C4}:a_{i,j}\in\{0,1\},\forall i,\forall j\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{A}$为用户接入因子矩阵；$P^l=[P_1^l,\ P_2^l,\ \cdots,\ P_N^l]$为各AP发射功率集合；$D_i$为用户$i$的速率需求；$E_{\min}$和$E_{\max}$分别为室内最小和最大照明强度；$P_{\min}$和$P_{\max}$分别为AP最小和最大发射功率。目标O1为最大化系统吞吐量；O2为最大化室内照明均匀度。约束条件C1表示QoS速率需求约束，D_i为用户最小速率需求；C2表示室内照明强度约束；C3表示各VLC AP的发射功率约束；约束条件C4表示用户是否关联VLC AP。式(7)表示的联合优化用户接入和功率分配的优化目标是非凸问题，无法直接采用凸优化方法求解[6,18]。本文提出联合优化照明和吞吐量的VLC协作用户接入和功率动态调整(VCUA-DPA)方法。

3 联合优化照明和吞吐量的VLC协作用户接入和功率动态调整方法

VCUA-DPA方法包括VLC协作用户接入(VCUA)算法和动态功率调整(DPA)算法，在VCUA算法中，设计考虑用户速率需求、信道增益和AP负载的算法，实现用户关联协作的VLC AP，抑制ICI和提高系统吞吐量；在DPA算法中，首先采用Dinkelback算法[6,16]求解最大化照明均匀度为目标的各VLC AP的基准发射功率，然后，设计考虑用户速率、用户数目和ICI影响的提高系统吞吐量的动态功率调整策略，调整部分AP的发射功率，旨

在满足室内照明均匀度最小阈值前提下提高系统吞吐量。

3.1 基于用户需求的VLC协作用户接入算法(VCUA)

根据用户速率需求，首先为每个用户分配初始带宽，由式(7)约束条件C1得用户i初始带宽为

$$B_i'=\frac{D_i}{\log_2\left(1+\left(\gamma h_{i,j^*}P_{j^*}\right)^2\Big/\left(\sum\limits_{\substack{r\in X_i\\ r\neq j^*}}\left(\gamma h_{i,r}P_r\right)^2+n_0B_{\min}\right)\right)} \tag{8}$$

式中，$B_{\min}=B/|Y_{j^*}|$为AP j*给候选用户i分配的最小带宽，APj*为用户i信道条件最好的AP，B为AP最大通信带宽，Y_{j*}为AP j*中满足信道增益阈值要求的候选用户集合，X_i为用户i的候选AP集合。

根据用户速率需求和用户在VLC中获得可达速率，用户i的需求权重因子为

$$\rho_i=\min\left(\frac{D_i}{R_i},1\right) \tag{9}$$

由式(9)知，随着协作VLC AP数增加，用户i在VLC中的可达速率R_i增加，则用户的资源需求权重因子下降。AP j为用户i提供带宽资源的供应权重因子可表示为

$$\kappa_{i,j}=\min\left(\frac{B_j^R}{B_i'},1\right) \tag{10}$$

式中，$B_j^R=B-\sum_{i\in M}a_{i,j}B_i'$表示AP$j$的剩余带宽，$k_j=\{\kappa_{i,j},\forall j\in Y_j\}$为AP j的供应权重因子集合。

根据供应和需求的权重因子，设计用户i接入AP j的优先级为

$$w_{i,j}=(\rho_i+\kappa_{i,j})\log_2\left(1+\frac{\left(\gamma h_{i,j}P_j\right)^2}{n_0B_{\min}}\right) \tag{11}$$

式中，$w_{i,j}$越大，用户i的优先级越高，表明用户i的需求越大或者AP j为用户i提供服务更有利于提高系统吞吐量。基于用户需求的VLC协作用户接入算法见算法1。

算法1　基于用户需求的VLC协作用户接入(VCUA) 算法

输入：N_A, M_U, B，用户的信道增益矩阵$\boldsymbol{H}=[h_{i,j}]_{M\times N}$、初始发射功率$\boldsymbol{P}^{(0)}$、用户满意度阈值$\rho_{\text{th}}$；

输出：用户和AP接入矩阵$\boldsymbol{A}=[a_{i,j}]_{M\times N}$；

(1) 根据式(2)，计算用户和候选AP的信道增益值，分别建立用户i关联AP的关联集合，各AP j关联用户的AP关联集合，$i\in M_U$, $j\in N_A$；

(2) 所有用户i从候选AP集中选择信道增益值最大的AP，记为AP j^*，令$a_{i,j^*}=1$，并删除AP j*的关联集合；

(3) **repeat**

(4)　选择剩余带宽最大的AP j*为本轮迭代的提供者，则AP j*的候选用户为本轮迭代的需求者；

(5)　由式(9)和式(10)，分别计算用户i的需求权重因子和AP j的供应权重因子，$i\in M_U$, $j\in N_A$；

(6)　由式(11)，计算各候选AP j的用户接入优先级，$j\in N_A$；

(7)　从用户的关联集合中，选择用户接入优先级最高的候选AP j，分别记为用户i*和AP j*，令$a_{i^*,j^*}=1$；

(8)　计算AP j*的剩余带宽，计算用户i*的需求权重因子；

(9)　若$B_{j^*}^R\le 0$，删除AP j*的关联集合；

(10)　若$\rho_{i^*}\le\rho_{\text{th}}$，则删除用户$i$*的关联集合；

(11) **until** 所有用户确定关联的协作VLC AP.

3.2 联合优化照明和吞吐量的动态功率调整算法(DPA)

本文所提的DPA算法先采用Dinkelbach算法求解最大化照明均匀度的各VLC AP的基准发射功率；然后，在满足用户速率需求、室内照明强度和室内最小照明均匀度条件下，动态调整部分AP发射功率。

3.2.1 基于Dinkelbach算法优化照明均匀度的AP基准功率分配

为了优化室内Cell-free VLC照明均匀度，根据式(7)，满足C2和C3约束条件的最大化室内照明均匀度的优化目标O2可以进一步转换为最大最小化各VLC AP的室内照明强度问题O3[16]

$$\text{O3:}\max_{P^l}\min_{s=1,2,\cdots,S}\frac{E_s}{\frac{1}{S}\sum\limits_{s=1}^{S}E_s} \tag{12}$$

本文采用Dinkelbach算法将优化目标O3的分式形式转换为等效的减法形式[6]，再通过更新迭代以确定照明均匀度的VLC AP的最优发射功率[11,13]。优化目标O3的最大照明均匀度表示为

$$\mu^* = \max_{P^l\in\Gamma}\min_{s=1,2,\cdots,S}\frac{E_s}{\dfrac{1}{S}\displaystyle\sum_{s=1}^{S}E_s} = \min_{s=1,2,\cdots,S}\frac{E_s(P^{l*})}{\dfrac{1}{S}\displaystyle\sum_{s=1}^{S}E_s(P^{l*})} \tag{13}$$

式中，Γ为优化目标O3的约束条件C2和C3的可行域，$\boldsymbol{P}^{l^*}$为优化目标O3的最优解集合。

对式(13)的分式形式进行等价转换[6]，其表达式为

$$F(\mu^*) = \max_{P^l\in\Gamma}\min_{s=1,2,\cdots,S}\left(E_s - \frac{\mu^*}{S}\sum_{s=1}^{S}E_s\right) = \min_{s=1,2,\cdots,S}\left\{E_s(P^{l^*}) - \frac{\mu^*}{S}\sum_{s=1}^{S}E_s(P^{l^*})\right\} \tag{14}$$

式中，当$F(\mu^*)=0$时，获得最优解μ^*和$\boldsymbol{P}^{l^*}$。引入变量$f=\min\limits_{s=1,2,\cdots,S}\left[E_s-(\mu/S)\sum_{s=1}^{S}E_s\right]$，则O3转换为

$$\left.\begin{aligned}&\text{O3'}:\ F(\mu)=\max_{P^l,f} f\\ &\text{s.t.}\overline{\text{C}}1:-E_s\le -E_{\min},\forall s\\ &\quad\overline{\text{C}}2:E_s\le E_{\max},\forall s\\ &\quad\overline{C}3:E_s-\frac{\mu}{S}\sum_{s=1}^{S}E_s\ge f,\forall s\\ &\quad\overline{\text{C}}4:0\le P_j^l\le P_{\max},\forall j\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

式中，给定μ值，目标函数和约束条件都是线性函数，因此，优化目标O3'为线性规划问题，可由Dinkelbach单纯形法[6,16]求解，从而得到满足照明均匀度的优化的AP基准功率。

3.2.2 基于动态功率调整策略的联合优化照明和吞吐量的动态功率调整

本文的动态功率调整策略的优化目标转换为：在满足最小照明均匀度的约束下，优化AP发射功率以提高SINR，增加系统吞吐量，则式(7)的功率分配优化问题O1转换为

$$\text{O4}:\max_{\boldsymbol{P}}\sum_{i=1}^{M}R_i,\mu\ge\mu_{\min} \tag{16}$$

式中，$\mu_{\min}$为最小照明均匀度阈值，$\mu\ge\mu_{\min}$表示室内照明均匀度不小于最小照明均匀度阈值。

为了衡量VLC AP的基准发射功率增加ΔP后，该小区内服务用户的吞吐量增加收益和对小区外周围用户增加干扰造成的吞吐量损失，VLC AP j的吞吐量增益的计算公式为

$$G_j^{\text{in}} = R_j^{\text{in}} + L_j^{\text{in}} \tag{17}$$

式中，R_j^{in}表示VLC AP j的基准发射功率增加了ΔP给服务用户带来的可达速率收益值，L_j^{in}表示VLC AP j的基准发射功率增加了ΔP给干扰用户带来的可达速率损失值。

同理，为了衡量VLC AP的基准发射功率减少ΔP后小区内服务用户的吞吐量损失和小区外干扰用户的吞吐量收益，VLC AP j的吞吐量增益的计算公式为

$$G_j^{\text{de}} = R_j^{\text{de}} + L_j^{\text{de}} \tag{18}$$

式中，R_j^{de}表示VLC AP j的基准发射功率减少ΔP对干扰用户降低ICI带来的吞吐量收益值，而L_j^{de}表示VLC AP j的基准发射功率减少ΔP对服务用户带来的吞吐量损失值。

基于各个VLC AP的吞吐量增益，在满足照明均匀度的约束下，动态功率调整策略有选择性地调整部分VLC AP的基准发射功率，以提高系统吞吐量。DPA步骤见算法2。

4 仿真分析

4.1 仿真环境及评价指标

本文使用蒙特卡罗法对本文所提VCUA-DPA方法的子算法VCUA和DPA的性能进行仿真，仿真参数如表1所示。在图1所示的室内Cell-free VLC网络中，5 m×5 m×3 m的房间布置有9个VLC AP和50×50个接收点。为了验证VCUA算法的有效性，QDAA[9]和MMABG[10]算法作为VCUA算法的对比算法。同时，为了消除功率分配对系统性能的影响，VCUA算法和对比的QDAA, MMABG算法都使用本文所提的DPA算法分配和调整AP的发射功率；为了验证DPA算法的功率调整的有效性，本文将SFA[16]和UFA[16]作为DPA算法的对比算法，而且，这3种功率分配算法的用户接入策略都采用用户满意度阈值ρ_{th}=0.8的VCUA算法。用户的速率需求随机取值为$D_i\in\{10,20,30\}$ Mbit/s。本文对各算法的系统吞吐量、用户满意度[12]和照明均匀度3个性能指标进行仿真和分析。

4.2 仿真结果及分析

图2展示了QDAA-DPA, MMABG-DPA和本文所提VCUA-DPA算法的系统吞吐量随用户数目的变化情况。3种算法的系统吞吐量随用户数目增加均呈现上升趋势，而本文VCUA-DPA算法的系统吞吐量优于2种对比算法。QDAA-DPA算法采用单小区接入方式，小区边缘用户容易受到ICI影响，导致系统吞吐量较低；MMABG-DPA算法采用多小区接入方式，但是MMABG算法没有考虑各

算法2　联合优化照明和吞吐量的动态功率调整 (DPA) 算法

输入：N，M，B，$\boldsymbol{\mu}_{\min}$，接收点的信道增益矩阵$\boldsymbol{H}_s=[h_{s,j}]_{S\times N}$、AP j的服务用户集合A_j、AP j的干扰用户集合Q_j、用户i的服务VLC AP集合C_i、迭代次数t=1、最大迭代次数$T_{\max}$、最小和最大照明强度$E_{\min}$和$E_{\max}$、基准发射功率增量ΔP、基准发射功率增量最小值$\Delta P_{\min}$、发射功率增量的调整系数ε，$0<\varepsilon<1$；

输出：联合优化照明和吞吐量的各AP发射功率$P^*=[P_1,\ P_2,\ \cdots,\ P_N]$；

(1) 根据式(15)，执行Dinkelbach单纯形法[6]求解优化目标O3'的各VLC AP发射功率$\boldsymbol{P}^l$；

(2) **for** $j=1,2,\cdots,N$ **do**

(3) 由式(17)计算AP j的基准发射功率增加ΔP时吞吐量增益G_j^{in}，由式(18)计算AP j的基准发射功率减少ΔP时吞吐量增益G_j^{de}；

(4) 若$G_j^{\text{in}}>G_j^{\text{de}}$，则AP的编号$j$加入$V_{\text{in}}$集合；否则，AP的编号$j$加入$V_{\text{de}}$集合；

(5) **end for**

(6) **while** $t<T_{\max}$ **do**

(7) **for** $j\in V_{\text{in}}$ **do**

(8) 由式(17)计算AP j的基准发射功率增加ΔP时的吞吐量增益G_j^{in}，若$G_j^{\text{in}}>0$且$(P_{\max}-P_j^l)\geq\Delta P$，进一步判断AP j的所有干扰用户是否都能满足用户速率需求，若是，则AP j加入G集合；

(9) **end for**

(10) **for** $j\in V_{\text{de}}$ **do**

(11) 由式(18)计算AP j的基准发射功率减少ΔP时的吞吐量增益G_j^{de}，若$G_j^{\text{de}}>0$且$(P_{\max}-P_j^l)\geq\Delta P$，进一步判断AP j的所有服务用户是否都能满足用户速率需求，若是，则AP j加入G集合；

(12) **end for**

(13) 若G集合为空集，则转步骤(18)；否则，转步骤(14)；

(14) 按照吞吐量增益值大小对G集合中的AP进行降序排序；

(15) 记G集合中第一个AP为 j^*，若AP j^*为V_{in}集合中的AP，则转步骤(16)；否则，转步骤(17)；

(16) 由式(5)和式(6)分别计算AP j^*的基准发射功率为$P_{j^*}^l+\Delta P$时各接收点的E_s和μ^*，若$E_{\min}\leq E_s\leq E_{\max},\forall s$且$\mu^*\geq\mu_{\min}$，则AP j^*的发射功率调整为$P_j^l=P_j^l+\Delta P$，令$t=t$+1，转步骤(6)；否则，从G集合中删除AP j^*，转步骤(13)；

(17) 由式(5)和式(6)分别计算AP j^*的基准发射功率为$P_{j^*}^l-\Delta P$时各接收点的E_s和μ^*，若$E_{\min}\leq E_s\leq E_{\max},\forall s$且$\mu^*\geq\mu_{\min}$，则AP j^*的发射功率调整为$P_j^l=P_j^l-\Delta P$，令$t=t$+1，转步骤(6)；否则，从G集合中删除AP j^*，转步骤(13)；

(18) 令$\Delta P=\Delta\times\varepsilon$，若$\Delta>\Delta P_{\min}$，则转步骤(7)；否则，转步骤(20)；

(19) **end while**

(20) 令$P^*=P^l$，输出联合优化照明和吞吐量的各AP发射功率P^*。

表 1　仿真参数

参数	含义	数值	参数	含义	数值
h	PD的高度	0.85 m	$\mu_{\min}$	最小照明均匀度	0.7
$P_{\min}$	VLC AP的最小发射功率	3 W	$E_{\min}$	最小照明强度	300 lx
$P_{\max}$	VLC AP的最大发射功率	10 W	$E_{\max}$	最大照明强度	1500 lx
B	VLC系统带宽	40 MHz	ΔP	基准发射功率的增量	1.5 W
$\phi_{1/2}$	发射机的半功率角	60°	$\Delta P_{\min}$	基准发射功率增量最小值	0.3 W
ψ_c	接收机视场角	60°	ε	基准发射功率增量调整系数	0.8
A_{PD}	PD的接收面积	1 cm^2	$T_{\max}$	功率调整的最大迭代次数	20
γ	光电转换系数	0.53 A/W	δ	LED发射光功率和光通量的转换系数	2.1 mW/lm

VLC AP负载均衡的问题，致使各VLC AP资源不充分利用，因而系统吞吐量提升值较小。本文VCUA-DPA算法考虑用户侧速率需求和网络侧AP的负载均衡，优化用户和多VLC AP协作的双向选择，提高各VLC AP资源利用率，其系统吞吐量优于2种对比算法。其次，本文的VCUA-DPA算法结合用户满意度阈值ρ_{th}和AP的剩余资源情况自适应地控制协作小区数目，当用户数较少时，VLC AP资源竞争小，若用户满意度阈值较小时，可协作的小区数目较多，有利于提高系统吞吐量，而当用户满意度阈值较大时，可协作小区数目减少，限制了系统吞吐量的增加；当用户数目持续增加时，由于VLC

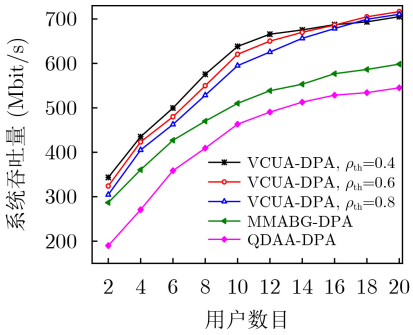

图 2 系统吞吐量与用户数目关系

AP的带宽资源有限，即使用户满意度阈值减小，协作小区数目也难继续增加，3种满意度阈值ρ_{th}获得的系统吞吐量差距越来越小。

图3展示了QDAA-DPA, MMABG-DPA和VCUA-DPA算法的用户满意度随用户数目的变化情况。3种算法的用户满意度随用户数目增加均呈现下降趋势，因为用户数目增加，AP的带宽资源竞争更加激烈，导致部分用户不能满足请求的速率需求，则用户的满意度下降。QDAA-DPA算法根据用户速率需求确定用户接入优先级，高速率需求的用户优先选择性能更优AP，但是，边缘用户受到ICI影响大且因为不支持多VLC AP协作传输的机制，使边缘用户的用户满意度较低。MMABG-DPA算法采用固定阈值控制协作AP小区数目，且没有区分用户接入VLC AP的优先级，因此，需求速率有差异的中、高速率用户的用户满意度下降。而本文VCUA-DPA算法既考虑用户侧的用户速率需求设计接入VLC AP和带宽分配的优先级，又考虑AP的负载均衡，并根据用户满意度阈值和AP资源剩余情况控制协作小区数目，所以本文VCUA-DPA算法的用户满意度普遍优于对比算法。此外，当用户数较多时，资源比较紧缺，VLC将更多AP协作资源分配给不满足用户速率需求的用户，有利于提高用户的满意度。

图4展示了用户数目M=10的条件下，本文VCUA-DPA算法中DPA优化后的系统吞吐量和照明均匀度随迭代次数增加的变化情况。其中，在各VLC AP的发射功率优化前，照明强度范围为460.90～880.36 lx，照明均匀度为0.611。如图4所示，随着迭代次数增加，系统吞吐量先增加后开始变平缓，而照明均匀度持续下降到最小照明均匀度阈值，且优化后的室内照明强度范围为316.62～506.24 lx，照明均匀度为0.708，高于优化前的室内照明均匀度，满足室内照明需求。这是因为DPA策略先根据每个VLC AP的吞吐量增益值大小调整满足照明约束条件的VLC AP的发射功率以增加系统吞吐量，刚开始时候，VLC AP可调整的功率幅度ΔP值较大，系统吞吐量增加较为明显；随着迭代次数增加，各AP发射功率偏离最优化照明均匀度确定的基准发射功率越来越远，照明均匀度越来越接近最小的照明均匀度阈值，导致VLC AP可调整的功率幅度ΔP值越来越小，由于各VLC AP的发射功率受限，所以系统吞吐量增加的速度越来越慢，并最终趋于平稳。

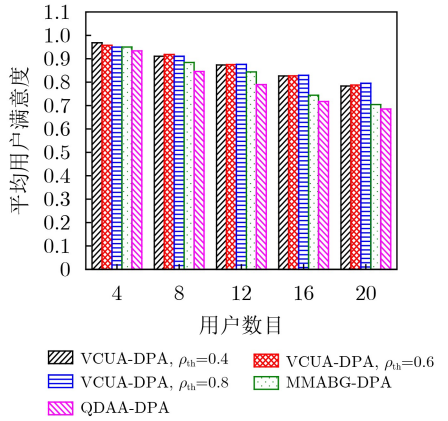

图 3 平均用户满意度与用户数目关系

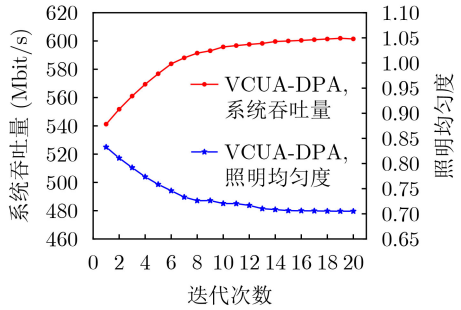

图 4 系统吞吐量和照明均匀度与迭代次数关系(M = 10)

图5展示了本文所提VCUA-DPA算法与对比的VCUA-UFA和VCUA-SFA算法采用不同功率分配策略对系统吞吐量与用户数目关系的影响。3种算法的功率分配策略都使系统吞吐量随用户数目增加均呈现上升趋势。当用户数目为10时，相比SFA算法，本文VCUA-DPA算法获得的系统吞吐量降低了8.1%，VCUA-UFA降低了18.5%，而本文VCUA-DPA算法较VCUA-UFA算法的系统吞吐量提高了9.5%。这是因为：SFA算法以系统吞吐量为主要目标，能协调各AP的发射功率，在满足用户速率需求的前提下，以牺牲照明均匀度为代价最大限度地提高系统吞吐量。相比SFA算法，本文VCUA-DPA算法在损失部分吞吐量的代价下，兼顾了照明均匀度和提高系统吞吐量两个目标。而对比的VCUA-UFA通过测量用户间的距离调整各VLC AP的发射功率最优化室内的照明均匀度，UFA策略没有考

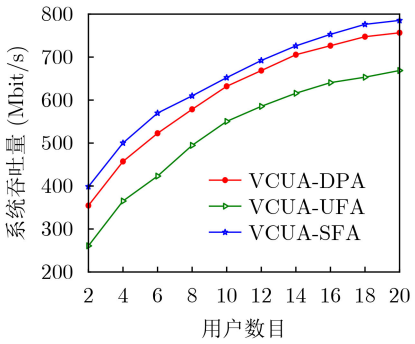

图 5 系统吞吐量受用户数目的影响

虑用户之间的干扰和不同速率需求用户所需的AP发射功率对系统吞吐量影响，因此，随着用户数目增加，VCUA-UFA的系统吞吐量增加值较小；相比UFA算法，本文的DPA算法先根据照明均匀度和系统吞吐量目标优化各VLC AP的基准发射功率，并采用动态功率调整策略，有选择地调整满足吞吐量增益的VLC AP的发射功率，设计功率调整幅度迭代衰减的方法，使其系统吞吐量提升效果优于VCUA-UFA。

5　结束语

为了优化自由小区VLC的系统吞吐量和满足室内照明均匀度需求，本文设计基于用户需求和VLC AP资源约束的多VLC AP协作用户接入算法和动态调整VLC AP发射功率方法，实现了室内Cell-free VLC的联合优化室内照明均匀和提高系统吞吐量的目标。随着宽带室内移动接入需求和移动互联网发展，本文所提方法能促进VLC系统在满足室内照明舒适需求的同时，为室内高速数据传输提供较为理想的绿色无线传输方式。

参 考 文 献

[1] 徐常志, 靳一, 李立, 等. 面向6G的星地融合无线传输技术[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(1): 28–36. doi: 10.11999/JEIT200363.
XU Changzhi, JIN Yi, LI Li, *et al*. Wireless transmission technology of satellite-terrestrial integration for 6G mobile communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(1): 28–36. doi: 10.11999/JEIT200363.

[2] 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. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.201904090122.
XIE Xianzhong, GAO Longlong, and LU Huabing. 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. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.201904090122.

[3] 付亚伟. 大数据互联网时代光纤通信技术的发展与挑战[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2021, 33(1): 52–58. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.201905080181.
FU Yawei. Development and challenge of optical fiber communication technology in the era of big data internet[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*:*Natural Science Edition*, 2021, 33(1): 52–58. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.201905080181.

[4] DENG Jiajun, JIN Xianqing, MA Xiaoting, *et al*. Graph-based multi-user scheduling for indoor cooperative visible light transmission[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 15984–16002. doi: 10.1364/OE.392353.

[5] CHEN Jiaxuan and WANG Zhaocheng. Joint design of user scheduling and precoding for interference management in cell-free VLC network[C]. IEEE Global Communications Conference, Waikoloa, USA, 2019: 1–6. doi: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013402.

[6] JIANG Rui, WANG Qi, HAAS H, *et al*. Joint user association and power allocation for cell-free visible light communication networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(1): 136–148. doi: 10.1109/JSAC.2017.2774400.

[7] CHEN Jiaxuan, WANG Zhaocheng, and JIANG Rui. Downlink interference management in cell-free VLC network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(9): 9007–9017. doi: 10.1109/TVT.2019.2931698.

[8] 刘焕淋, 吴兰, 陈勇, 等. 基于QoS决策的异构VLC/WiFi网络联合收发端需求的接入点选择[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0806002. doi: 10.3788/CJL201946.0806002.
LIU Huanlin, WU Lan, CHEN Yong, *et al*. QoS-based decision-making access-point selection under joint demands of transmitting and receiving in heterogeneous VLC/WiFi networks[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0806002. doi: 10.3788/CJL201946.0806002.

[9] YANG Helin, ZHONG Wende, CHEN Chen, *et al*. QoS-driven optimized design-based integrated visible light communication and positioning for indoor IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 269–283. doi: 10.1109/JIOT.2019.2951396.

[10] FENG Simeng, ZHANG Rong, XU Wei, *et al*. Multiple access design for ultra-dense VLC networks: Orthogonal vs non-orthogonal[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(3): 2218–2232. doi: 10.1109/TCOMM.2018.2884482.

[11] 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. doi: 10.1109/TGCN.2018.2886605.

[12] 刘焕淋, 蒲欣, 陈勇, 等. 室内VLC-WiFi异构网络基于动态载波分配的干扰管理策略[J]. 电子学报, 2021, 49(10): 1920–1926. doi: 10.12263/DZXB.20210072.
LIU Huanlin, PU Xin, CHEN Yong, *et al*. Interference management strategy based on dynamic carrier allocation for indoor VLC-WiFi heterogeneous network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(10): 1920–1926. doi: 10.12263/DZXB.20210072.

[13] 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. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.201902150057.
LEI Xinying and WANG Cheng. Design of amultiple 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. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.201902150057.

[14] GIANG D T, PHAM T S, NGO Q M, *et al*. An alternative approach for high uniformity distribution of indoor lighting LED[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 7100810. doi: 10.1109/JPHOT.2020.2979609.

[15] LIU Huanlin, LIN Zhenyu, XU Yang, *et al*. Coverage uniformity with improved genetic simulated annealing algorithm for indoor Visible Light Communications[J]. *Optics Communications*, 2019, 439: 156–163. doi: 10.1016/j.optcom.2018.12.084.

[16] MUSHFIQUE S I, ALSHAROA A, and YUKSEL M. Optimization of SINR and illumination uniformity in multi-LED multi-datastream VLC networks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(3): 1108–1121. doi: 10.1109/TCCN.2020.2972310.

[17] MA Shuai, ZHANG Fan, LI Hang, *et al*. Aggregated VLC-RF systems: Achievable rates, optimal power allocation, and energy efficiency[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(11): 7265–7278. doi: 10.1109/TWC.2020.3010294.

[18] WEI Zhengyuan, HU Haiying, and HUANG Huamao. Optimization of location, power allocation and orientation for lighting lamps in a visible light communication system using the firefly algorithm[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8796–8808. doi: 10.1364/OE.420773.

刘焕淋：女，教授，硕士生导师，研究方向为光通信技术和网络.
杨 帅：男，硕士生，研究方向为可见光通信技术.
陈 勇：男，教授，硕士生导师，研究方向为自动控制和光信号处理.
黄美娜：女，硕士生，研究方向为可见光通信技术.
陈浩楠：男，硕士生，研究方向为可见光信号定位和处理.
陈 科：男，硕士生，研究方向为可见光通信技术.
袁夕淋：男，硕士生，研究方向为可见光通信技术.

责任编辑：马秀强