

# VLC 网络中兼具功率与时隙分配的 自适应干扰管理机制

高龙龙 谢显中 卢华兵

(重庆邮电大学通信与信息工程学院/计算机网络与通信重庆市重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 为了解决目前可见光通信 (visible light communication, VLC) 中干扰管理方案存在的动态优化问题, 提出了一种兼具优化功率分配与时隙分配的自适应干扰管理机制。首先, 在每个时隙依据用户的位置建立每个用户的接入点 (access point, AP) 协作集, 寻找所有由最多数量互不干扰用户组成的极大独立集, 以此自适应地避免同频干扰; 在每个时隙为每个极大独立集采用改进的线性注水功率分配算法为信道自适应地分配发送功率, 以此优化每个极大独立集的用户和速率; 基于用户和速率、速率公平性及时延公平性的归一化优先因子, 选出具有最大优先因子的候选极大独立集, 其中包含的用户在该时隙被调度。通过仿真且与代表性文献中的算法比较可得, 本文提出的自适应干扰管理与优化资源分配方案在网络频谱利用率、能效、用户速率公平性与时延公平性方面具有明显优势。

**关键词:** 可见光通信; 自适应干扰管理; 功率与时隙分配; 极大独立集; 优先因子

**中图分类号:** TN929.1      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.003

**引用格式:** 高龙龙, 谢显中, 卢华兵. VLC 网络中兼具功率与时隙分配的自适应干扰管理机制[J]. 信号处理, 2020, 36(2): 177-187. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.003.

**Reference format:** Gao Longlong, Xie Xianzhong, Lu Huabing. Adaptive Interference Management Scheme with Power and Time Slot Allocation for VLC Networks[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(2): 177-187. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.003.

## Adaptive Interference Management Scheme with Power and Time Slot Allocation for VLC Networks

Gao Longlong Xie Xianzhong Lu Huabing

(College of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,  
Computer Network and Communication Chongqing Key Laboratory, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In order to better solve the existing problems of dynamic optimal interference management schemes for visible light communication (VLC) networks, an interference management scheme with both optimal power allocation and time slot allocation is proposed. At each time slot, firstly, access point (AP) coordinated sets for each user are established by the users' location to eliminate interference, and all maximal independent sets including the largest number of non-interfered users are found. According to the difference of channel gain, for each maximal independent set the power is allocated to the channels by improved linear water-filling power allocation algorithm, which optimizes sum rate of each maximal independent set. Furthermore, considering the normalized priority factors involving sum rate, rate fairness and delay fairness, and the

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2019-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61601070); 重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-K201800603); 重庆市基础与前沿研究计划项目( cstc2018jcyjAX0432); 重庆市研究生创新教育计划(CYB17131, CYS17223, BYJS2017003)

candidate maximal independent set with the maximum sum of priority factors is selected, in which the users involved are scheduled at the timeslot. By simulation and comparison with the algorithms in representative literatures, the proposed interference management and resource allocation scheme have obvious advantages with spectrum utilization, energy efficiency, rate fairness and delay fairness.

**Key words:** visible light communication; adaptive interference management; power and time slot allocation; maximal independent set; priority factor

## 1 引言

随着移动终端数量的剧增以及人们对网络性能的需求不断增强,传统的 RF (radio frequency) 通信方式有了越来越多的限制,可见光通信 (visible light communication, VLC) 作为一种高效灵活的新型通信手段受到广泛关注<sup>[1]</sup>。VLC 是将信号调制到 LED 发出的可见光上,利用光线的明暗强度变化传递信息达到同时照明和通信的效果。该技术具备超大带宽、超高速率、布设方便、绿色健康的特点,可以作为医院、核电站、化工厂、空间站以及保密场所等特定场景中极具潜力的通信解决方案<sup>[2-4]</sup>。VLC 的下行速率可突破 Gbit/s,这种高速数据传输方式为车联网、物联网、无人驾驶、室内定位、大数据传输乃至未来 6G 提供有效的通信与网络服务<sup>[5]</sup>。VLC 也可以作为下行传输方式与电力线通信、WiFi、蜂窝通信、毫米波通信等组成异构通信网络<sup>[6]</sup>,合作实现用户移动无缝切换、密集用户信号全覆盖以及个性服务等通信需求,进而极大提升数据通信的效益<sup>[7]</sup>。

VLC 由早期的单用户网络结构逐渐向多用户多接入点 (access point, AP) 发展<sup>[8]</sup>,但是由于单个 AP 可能为其覆盖范围内的多个用户服务,单个用户可能接收来自多个 AP 的视距光信号,这会导致 AP 与用户组网时产生的同信道干扰 (co-channel interference, CCI) 或同频干扰<sup>[9]</sup>,因此高效的干扰管理、资源分配与多用户接入的组合解决方案成为如今研究的热点<sup>[10]</sup>。

VLC 网络中的用户性能受到所处位置、信道质量、AP 陈列及光线辐射角度等许多因素影响,近几年,针对不同的网络环境和性能需求,不同的干扰管理方案不断涌现<sup>[11-18]</sup>。[11] 为解决多用户间的干扰问题,同时识别用户变化的性能需求,提出动

态时分多址 (time division multiple access, TDMA) 用户接入机制,在满足基本光照、功率和服务质量 (quality of service, QoS) 限制的前提下,调节时隙和功率变量,使频谱效率和功效最大化。[12] 中基于改进 Tabu 搜索的动态频率复用的多用户接入机制,提出双向双 Tabu 列表策略,通过设计评估函数与激励标准,使得网络性能得到优化。[13] 在多用户 VLC 网络中提出非正交多址 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 用户接入机制,在保证用户速率公平性的前提下通过优化功率分配来最大化网络和速率。[14] 将 NOMA 与用户分组机制结合,首先基于用户位置将用户分组,抑制 CCI,同时每个 AP 中优化功率分配,在保证用户速率 QoS 的前提下最大化网络容量。[15] 为了解决多用户间的干扰问题,提出多点协作处理联合传输 (coordinated multipoint multipoint joint transmission, CoMP-JT) 切换机制,AP 根据用户的位置形成 AP 组,处于交叉覆盖范围的用户接收 AP 组发送的相同信息,当用户移动时,AP 组会自动切换,采用这种方式用户间干扰可以完全消除。[16] 在用户分簇与功率控制的同时,考虑网络负载均衡,采用双投影梯度算法和连续迭代凸近似算法实现非凸网络效益最大化。[17] 中联合用户分簇和功率分配,在满足用户速率 QoS 的限制时,最大化网络能效,AP 向簇内用户向量式传送信号,为了消除簇间干扰,最小化簇内用户离簇中心的距离,最大化不同簇中心的距离。[18] 提出自组织合作博弈 (self-organize cooperative game, SCG) 机制,每个时隙以优化速率为博弈目标,通过合并分裂迭代比较不同用户自组织合作实现干扰抑制,最终收敛得到最佳的合作状态。

文献[19-21]用图论方法,通过调度解决多用户间的干扰问题。[19] 提出动态用户分簇,为解决以用户为中心的多用户调度及性能最大化问题,将原

问题转换为基于用户-AP 距离为权重的最大加权匹配(maximum weighted matching, MWM)算法,然后采用基于暴力搜索的贪婪算法寻找平均吞吐量最大的最优解。[20]提出基于图论的用户调度、干扰管理与时隙分配机制,为了保证用户速率和时延公平性,每个时隙首先根据用户位置建立极大用户独立集,然后实施最大加权独立集搜索(maximum weighted independent set search, MWISS),即选择由速率和时延因子组成的加权和最大的极大独立集,选中集合中的用户为每个时隙调度的用户。[21]提出一种增量调度机制(incremental scheduling scheme, ISS)用来解决多用户移动情况下的网络调度与干扰管理机制,首先采用类似的基于图论寻找极大独立集的方法进行全局调度实现干扰消除,其次,当用户移动时采用速率增量较大者优先的局部调整调度方式,实现速率最优化。

以上多用户 VLC 网络的干扰管理与用户调度机制涉及到多种算法,但是有各自的不足之处。[11-12]中虽然能解决干扰问题,但是具有很大的实现复杂度。[13-14]中采用 NOMA 机制,而要达到收敛需要大量迭代。[15,18-19]仅考虑满足用户速率需求和最优化网络和速率,没有提出优化功率分配机制。[16]中考虑了功率控制机制,但是由于是将原凸优化问题转化为近似优化问题,故可能找不到全局最优解。[17]将用户分簇与功率分配结合起来,实现基于用户速率 QoS 要求的能效最大化,但是此算法的优势目前只适用于 AP 数量多于用户数量的模型,并且未考虑速率公平性与时延公平性。[20]中关于时隙分配问题,虽然保证了用户时延公平性,但是没有做到优化功率分配。[21]将用户调度分为两步,以保证网络和速率为目标,但是忽略了用户性能的公平性与通信体验。另外,由于在室内 VLC 网络存在用户移动性,并且光源的发光功率要同时供应照明与通信,因此将优化功率分配算法与适于 VLC 网络中用户动态移动的调度方案结合是十分必要的<sup>[22]</sup>。

针对以上多用户 VLC 网络中干扰管理机制存在的问题,本文主要研究多用户多 AP 的 VLC 网络中整体性能与用户个体性能的均衡优化,提出了基于图论中极大独立集兼具最优化时隙分配与功率

分配的干扰管理与用户调度机制,包括寻找极大独立集、优化网络和速率的功率分配算法、基于优先因子的时隙分配算法,该方案可以在每个时隙根据用户位置、信道的动态变化而自适应地进行性能优化。

首先,由于在不同时隙 AP 与用户之间信道或用户的位置可能会出现变化,每个时隙根据用户的位置建立干扰矩阵,找出不会产生相互干扰的包含最多用户的所有由 AP 组成的极大独立集。为了优化网络能效,对每个极大独立集的用户按信道增益实施线性注水功率分配算法,计算每个极大独立集的和速率并将其归一化作为和速率优先因子,得到其中每个用户的速率公平度与时延公平度的乘积,并将每个极大独立集包含的所有用户的速率公平度与时延公平度的乘积求和且被归一化,将其作为公平度优先因子,将每个极大独立集的和速率优先因子与公平度优先因子作为其最终优先因子,选出具备最大优先因子的候选极大独立集,其中包含的用户为此时隙被调度的用户。通过仿真可知,与参考文献[17-18](基于非图论算法)及[19-20](基于图论算法)中的算法相比,本文的网络频谱利用率、能效、用户速率公平性和时延公平性均得到明显提升,并且本文算法能够根据用户的数量、位置与信道的动态变化而自适应调整以保障网络性能。

## 2 系统模型

本文考虑一个由  $K$  个 AP 和  $N$  个用户组成的室内密闭 VLC 网络(AP 被规则地固定在天花板),将 AP  $k$  与用户  $n$  分别进行编号,即  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,用户随机分布在室内,用户的位置可以分为位于交叉覆盖范围和非交叉覆盖范围。以如图 1 所示的 VLC 网络为例,T1, T2, T3 和 T4 是四个 AP, R1, R2, R3, R4 和 R5 是随机分布在各 AP 覆盖区域内的用户。规定四种覆盖区域类型: I 型-非交叉覆盖区域; II 型-两个 AP 的交叉覆盖区域; III 型-三个 AP 的交叉覆盖区域; IV 型-四个 AP 的交叉覆盖区域。为了适应网络中 AP 和用户的动态变化,在每个时隙都要统计 AP 和用户的数量,并分别进行编号。

整个网络采用中央集中控制的方式对 AP 与用

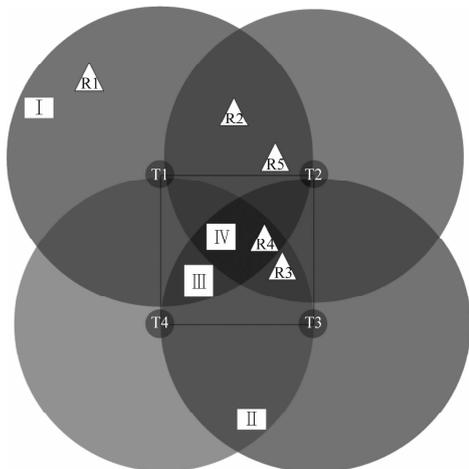


图1 VLC网络布局举例示意图

Fig. 1 Partial diagram of VLC network

户之间的链路进行调度,由于本文采取正交频分多址的多用户接入方式,在理想情况下,为了避免干扰,在每个时隙 AP 以协作的信息传输方式与用户建立信道,即位于交叉覆盖范围内的用户必须接收与其相关 AP 发送的相同信息;位于非交叉覆盖范围的用户只能接收与之相关唯一 AP 的信息,其中所有 AP 具有相同的待分配子载波数量,并且单个子载波含有的带宽是一致的。

第  $k$  个 AP 与第  $n$  个终端间的 LOS (line of sight) 信道增益采用朗伯模型的表达式为

$$h_{kn} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) \cos(\psi) T_f(\psi) g(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi \geq \psi_c \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $A$  为接收光电检测器的检测面积,  $d$  为 AP 到终端的距离,  $\varphi$  为发射角,  $\psi$  为接收角,  $m$  为朗伯辐射阶数,且  $m = \frac{-1}{\log_2(\cos \psi_{1/2})}$ ,  $\psi_c$  为光集中器视场角 (FoV),  $T_f(\psi)$  为滤光片增益,  $g(\psi)$  为光集中器增益。假定在同一个时隙内用户位置不变,故信道质量不变,即信道增益保持稳定。

用户接收到的光信号通过光电转换器变为电信号,即为

$$y_n = p_k h_{kn}^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K p_i h_{in}^2 + \sigma^2 \quad (2)$$

其中,等式右边第一项为用户收到的有用目标

信号,第二项为来自邻近 AP 的干扰信号,此项经过本文的 AP 协作传输机制可以被消除,第三项为高斯白噪声,本文忽略其他形式的噪声。

### 3 寻找极大独立集

为了避免用户之间的同频干扰,并且充分利用网络资源,每个时隙用户调度时首先要选择一组最大数量且不会产生相互干扰的用户。本文采用图论中独立集的概念,将用户抽象为点,若两个用户之间存在干扰可能性,则表明这两个点之间有边,否则无边。因此,每个时隙寻找最大数量的互不干扰用户转化为图论中的寻找极大独立集问题。

**定义 1** 设  $G = \langle V, E \rangle$  是简单无向图,  $S \subseteq V$ ,  $S \neq \emptyset$ , 若  $S$  中任何两个结点都不相邻,则称这个结点集合  $S$  为图  $G$  的独立集。若  $S$  是图  $G$  的独立集,但是任意增加一个结点后就不是独立集,则称这个独立集  $S$  为极大独立集。因此,网络中的极大独立集不是唯一的。

**定义 2** 设  $G = \langle V, E \rangle$  是简单无向图,  $T \subseteq V$ ,  $T \neq \emptyset$ , 若  $T$  中任意两个结点都相邻,则称  $T$  是图  $G$  的团。若  $T$  是图  $G$  的团,但是任意增加一个新结点后,  $T$  不再为团,则称  $T$  是图  $G$  的极大团。

与 [20-21] 中通过贪婪算法直接寻找极大独立集的方法不同,当室内用户增多时,为了降低寻找极大独立集的复杂度和计算量,本文采用 Bron-Kerbosch 算法通过将寻找极大独立集转化为寻找极大团来求得网络的所有极大独立集。

首先根据用户所处的位置,给出 AP 与用户之间的连通矩阵  $C_{N \times K}$ , 其中  $c_{n,k} = 0$  表示用户  $n$  不处于 AP  $k$  的覆盖范围内,  $c_{n,k} = 1$  表示用户  $n$  处于 AP  $k$  的覆盖范围内。根据用户之间的位置关系得到干扰矩阵 (邻接矩阵)  $E_{N \times N}$ , 按照规则干扰矩阵为实对称矩阵,并且对角线上元素为 0, 当  $e_{i,j} = 0$  时,表示用户  $i$  与用户  $j$  之间不存在干扰可能性,否则两个用户之间存在干扰可能性。干扰矩阵的元素由式 (3) 计算得到。

$$e_{i,j} = \begin{cases} \max \{ c_{i,k} c_{j,k}, k = 1, 2, \dots, K \}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (3)$$

先将图  $G$  转换为其补图  $\bar{G}$ , 进而得到补图的干扰矩阵  $E_{N \times N}^1$ , 由此找出补图的极大团。图  $G$  的团与独立集是互补的,因此,求  $G$  的极大独立集转化为

求  $\bar{\mathbf{G}}$  的极大团即可。依照实际的 VLC 网络空间布局采用图论的方法找到每个时隙的极大独立集, 这样不仅可以解决用户间干扰问题, 而且可以在不同时隙中根据用户位置的动态变化而自适应地找到所有的极大独立集。

#### 4 优化网络和速率的功率分配算法

为了优化每个极大独立集的用户和速率, 结合本文实际模型, 将[23]中功率分配算法进行适当改进, 在每个时隙对每个用户进行基于信道增益的线性注水功率分配, 即信道增益大的分得更多的功率, 信道增益小的分得更少的功率或者不分得功率。

在前期运用 AP 协作传输消除用户间干扰之后, 计算第  $t$  时隙每个极大独立集的和速率为

$$R_{s,t} = \sum_{n=1}^{N_{s,t}} r_{s,n,t} = \sum_{n=1}^{N_{s,t}} \log_2 \left( 1 + \frac{\sum_{k=1}^{K_{n,t}} p_{k,n,t} h_{k,n,t}^2}{N_0 B} \right) \quad (4)$$

其中,  $N_{s,t}$  为每个时隙极大独立集包含用户的数量,  $N_0$  为高斯白噪声的功率谱密度,  $B$  为信道带宽,  $P$  为每个时隙所有 AP 的总发送功率,  $K_{n,t}$  为第  $t$  个时隙与用户  $n$  相连的 AP 数量。

依据极大独立集-用户与 AP-用户的映射关系, 假设有

$$p_{s,n,t} h_{s,n,t}^2 = \sum_{k=1}^{K_{n,t}} p_{k,n,t} h_{k,n,t}^2 \quad (5)$$

其中,  $h_{s,n,t}^2$  称为映射信道增益,  $p_{s,n,t}$  称为映射发送功率。为了后面的公式推导和表达方便, 令  $H_{s,n,t} = \frac{h_{s,n,t}^2}{N_0 B}$ ,  $H_{k,n,t} = \frac{h_{k,n,t}^2}{N_0 B}$ 。按照实际功率分配情况, 具备以下两个约束条件。

$$\sum_{n=1}^{N_{s,t}} p_{s,n,t} = P \quad (6)$$

$$p_{s,n,t} = \sum_{k=1}^{K_{n,t}} p_{k,n,t} \quad (7)$$

为了更好地由映射信道增益求得映射发送功率, 本文定义映射信道增益与实际信道增益的关系为

$$H_{s,n,t} = \frac{1}{K_{n,t}} \sum_{k=1}^{K_{n,t}} H_{k,n,t} \quad (8)$$

通过极大独立集、用户与 AP 之间的关系且根据目标函数与约束条件建立拉格朗日函数。

$$L_{s,t} = \sum_{n=1}^{N_{s,t}} \log_2(1 + p_{s,n,t} H_{s,n,t}) - \lambda \left( \sum_{n=1}^{N_{s,t}} p_{s,n,t} - P \right) \quad (9)$$

分别对  $p_{s,n,t}$  和  $\lambda$  求偏导且均令为 0, 得到  $N_{s,t} + 1$  个方程

$$\begin{cases} \frac{\partial L_{s,t}}{\partial p_{s,n,t}} = \frac{1}{\ln 2} \frac{H_{s,n,t}}{1 + H_{s,n,t} p_{s,n,t}} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L_{s,t}}{\partial \lambda} = P - \sum_{n=1}^{N_{s,t}} p_{s,n,t} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

联立这一系列方程, 整理求得第  $i$  个用户在每个时隙得到的映射发送功率为

$$p_{s,i,t} = \frac{1}{N_{s,t}} \left( P - \frac{N_{s,t} - (i-1)}{H_{s,i,t}} + \sum_{n=i}^{N_{s,t}} \frac{1}{H_{s,n,t}} \right) \quad (11)$$

其中  $i \in \{1, 2, \dots, n, \dots, N_{s,t}\}$ , 从计算结果中可以看出, 当用户的映射信道增益很低时, 分得的功率可能为负值。

为了解决此问题, 由式(11)可以看出, 当每个时隙极大独立集包含用户的数量  $N_{s,t}$  已知时,  $\sum_{n=i}^{N_{s,t}} \frac{1}{H_{s,n,t}}$  为一个定值, 于是  $p_{s,n,t}$  与  $H_{s,n,t}$  成正相关关系, 即  $p_{s,n,t}$  会随着  $H_{s,n,t}$  的增大而增大。将每个时隙极大独立集中用户映射信道增益按从小到大升序排列,  $H_{s,1,t} \leq H_{s,2,t} \leq \dots \leq H_{s,N_{s,t},t}$ , 因此按照基于注水的功率分配思想有  $p_{s,1,t} \leq p_{s,2,t} \leq \dots \leq p_{s,N_{s,t},t}$ 。

从排序后的第一个用户开始, 按上式计算出第 1 个用户的映射发送功率, 如式(12), 若  $p_{s,1,t} \leq 0$ , 则令  $p_{s,1,t} = 0$ , 即由于该用户的映射信道增益太低, 不分得映射功率。接着计算下一个用户的映射发送功率, 如式(13)。

$$p_{s,1,t} = \frac{1}{N_{s,t}} \left( P - \frac{N_{s,t}}{H_{s,1,t}} + \sum_{n=1}^{N_{s,t}} \frac{1}{H_{s,1,t}} \right) \quad (12)$$

$$p_{s,2,t} = \frac{1}{N_{s,t}} \left( P - \frac{N_{s,t} - (2-1)}{H_{s,2,t}} + \sum_{n=2}^{N_{s,t}} \frac{1}{H_{s,2,t}} \right) \quad (13)$$

按照以上计算方式直至找到  $p_{s-c,t} > 0$ 。根据(10)对映射发送功率求偏导, 可以得到

$$\frac{H_{s,n,t}}{1+H_{s,n,t}P_{s,n,t}} = \lambda \ln 2 \quad (14)$$

进而有  $\frac{H_{s,n1,t}}{1+H_{s,n1,t}P_{s,n1,t}} = \frac{H_{s,n2,t}}{1+H_{s,n2,t}P_{s,n2,t}}$ , 又有  $P_{s,n2,t}$

$$= P_{s,n1,t} + \frac{1}{H_{s,n1,t}} - \frac{1}{H_{s,n2,t}}, \text{ 所以有}$$

$$P_{s,n,t} = P_{s-c,t} + \frac{1}{H_{s-c,t}} - \frac{1}{H_{s,n,t}} \quad (n > s) \quad (15)$$

通过以上方法根据每个时隙的每个极大独立集中映射信道增益分配映射为用户发送功率。

经过前期功率分配算法向每个极大独立集中的用户分配功率之后, 接下来每个用户向与其对应 AP 的链路分配功率。考虑到(6)中用户与映射发送功率的关系以及 AP 协作机制, 此时, 按照信道增益线性比例分配, 这样既能使与用户相关的每个 AP 参与协作传输, 又能让每个极大独立集的用户和速率更大, 具体分配方式为

$$p_{k,n,t} = P_{s,n,t} \frac{H_{k,n,t}}{\sum_{k=1}^{K_{n,t}} H_{k,n,t}} \quad (16)$$

每个时隙对所有的极大独立集进行功率分配之后, 根据(4)求得每个极大独立集所包含的用户和速率, 并且将其归一化为  $R_{s,t}^-$ 。

为了便于数据处理与计算, 本文中的归一化计算方法如式(17)。

$$x_j^- = \frac{x_j}{\max\{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_J\}} \quad (17)$$

其中数列长度为  $J$ ,  $x_j$  与  $x_j^-$  分别为归一化前与归一化后的数据量。

现在总结功率分配的实现过程如下:

**步骤 1** 计算得到每个时隙中各个极大独立集的和速率表达式, 通过建立拉格朗日函数, 求出映射发送功率与映射信道增益之间的关系式;

**步骤 2** 将每个极大独立集的映射信道增益升序排列, 计算找到大于 0 的映射发送功率, 自此以其为基点算出每个极大独立集中各用户的映射发送功率;

**步骤 3** 将每个极大独立集中用户的映射发送功率线性按信道增益比例分配给用户与 AP 协作集之间的链路, 即得到 AP 分配给每个信道的实际发送功率。

## 5 基于优先因子的时隙分配算法

考虑到每个时隙有不止一个极大独立集, 本文

为了在最大化网络和速率的同时保证用户速率公平性和时延公平性, 前期的功率分配已经做到优化网络和速率, 所以每个时隙在选择要调度的极大独立集时要综合考虑用户公平性(包括速率公平性和时延公平性)与和速率, 实现多目标均衡优化。

在已知每个时隙信道增益的前提下, 用户与 AP 之间的信道增益只与不同时隙的信道变化有关, 用户速率与用户属于哪个极大独立集无关, 时隙分配过程中每个时隙每个用户的速率为

$$r_{n,t} = \log_2 \left( 1 + \sum_{k=1}^{K_{n,t}} p_{k,n,t} H_{k,n,t} \right) \quad (18)$$

按照用户速率公平性因素在每个时隙选择极大独立集, 同时求出各个用户在每个时隙的平均速率为

$$\langle r_{n,t} \rangle = \begin{cases} (1 - \frac{1}{t}) \langle r_{n,t-1} \rangle + \frac{1}{t} r_{n,t-1}, & \text{用户 } n \text{ 在 } t-1 \text{ 被调度} \\ (1 - \frac{1}{t}) \langle r_{n,t-1} \rangle, & \text{用户 } n \text{ 在 } t-1 \text{ 未被调度} \end{cases} \quad (19)$$

为了使平均速率计算合理, 对用户在第一个时隙的平均速率有如下规定

$$\langle r_{n,1} \rangle = \begin{cases} r_{n,1}, & \text{用户 } n \text{ 在第一个时隙被调度} \\ \sum_{n=1}^{N_1} r_{n,1} / N_1, & \text{用户 } n \text{ 在第一个时隙未被调度} \end{cases} \quad (20)$$

其中  $N_1$  为第 1 个时隙网络中总的用户数量。

在每个时隙的用户调度时, 提出公平性优先因子, 其包含速率公平性和时延公平性两种含义, 每个时隙内每个极大独立集中各个用户的公平性优先因子为

$$w_{n,t} = \frac{r_{n,t}}{\langle r_{n,t} \rangle} \exp \left( \frac{D_{n,t} - \langle D_{n,t} \rangle}{1 + \sqrt{\langle D_{n,t} \rangle}} \right) \quad (21)$$

其中  $\langle D_{n,t} \rangle$  为每个用户在每个时隙的平均时延, 且规定有

$$\langle D_{n,t} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{N_{s,t}} D_{i,t}}{N_{s,t} - 1} \quad (22)$$

每个时隙计算得到各个候选极大独立集包含用户的公平性优先因子和为  $w_{s,t}$ , 如式(23), 并将其

归一化为  $w_{s,t}^-$ 。

$$w_{s,t} = \sum_{n=1}^{N_{s,t}} w_{n,t} \quad (23)$$

为了在每个时隙的用户调度时均衡网络和速率与用户公平性,在选择最优极大独立集时,将每个候选极大独立集的归一化公平性优先因子与对应归一化和速率的乘积作为综合优先因子。

$$W_{s,t} = R_{s,t}^- w_{s,t}^- \quad (24)$$

在每个时隙选择综合优先因子最大的候选极大独立集,该选定的极大独立集中包含的用户即为该时隙内调度的用户,即

$$s^* = \arg \max_s W_{s,t} \quad (25)$$

其中  $s^*$  为具有最大优先因子的候选极大独立集序号。

整个方案实现流程图如图 2。

本文整个用户调度算法的实现过程如下:

**步骤 1** 每个时隙根据用户的位置建立邻接矩阵,采用 Bron-Kerbosch 算法找出所有的极大独立集;

**步骤 2** 采用线性注水功率分配算法求出每个极大独立集包含用户的映射发送功率及与其相应 AP 之间的信道功率;

**步骤 3** 计算出每个极大独立集包含用户的和速率并归一化;

**步骤 4** 计算每个用户的公平性优先因子,以及每个候选极大独立集的公平性优先因子并归一化,将公平性优先因子与和速率优先因子的乘积作为每个候选极大独立集的综合优先因子;

**步骤 5** 选择具备最大优先因子的候选极大独立集,其包含的用户即在该时隙被调度。

## 6 仿真结果与分析

在典型的  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$  室内 VLC 场景,9 个 AP 固定在相同的水平高度,它们的发出光的覆盖半径为  $1.35\text{ m}$ ,并且每个 AP 具有可分配的时隙数量为 100,所有的终端都处于  $0.85\text{ m}$  的高度。为了便于本文方案与文献[17-20]中的算法进行性能比较,其他仿真参数设置如表 1 所示。

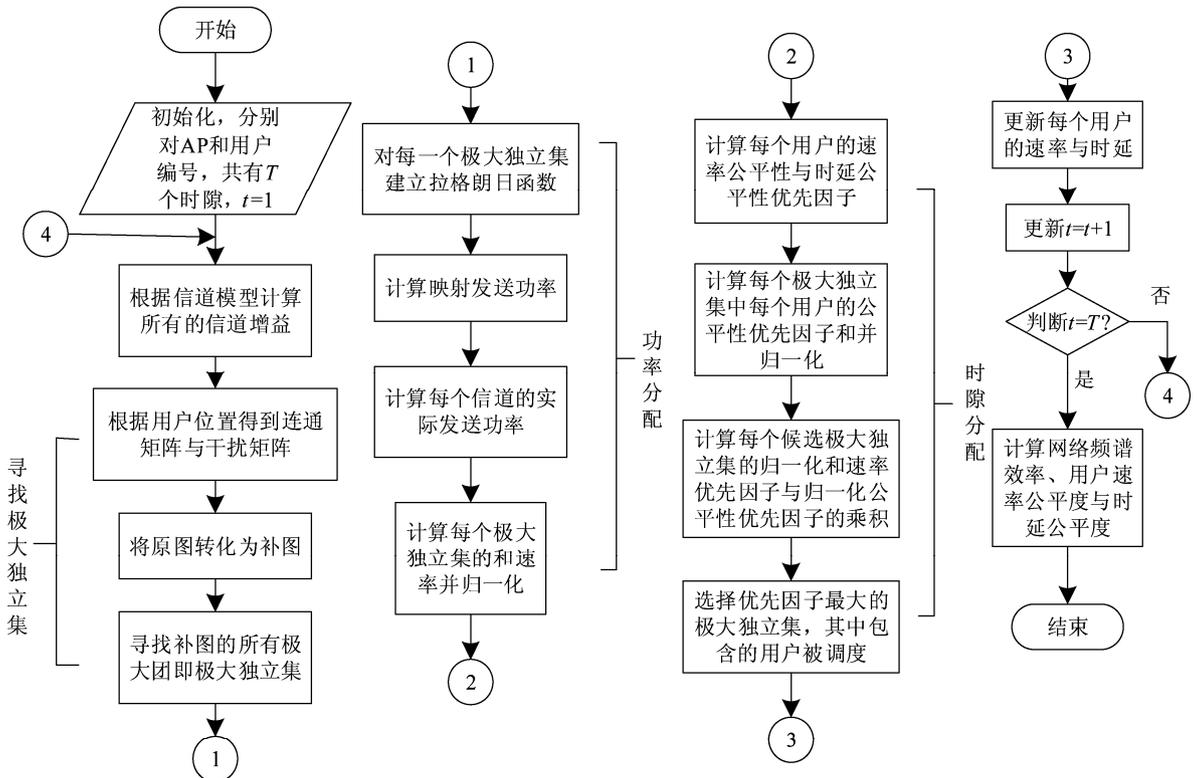


图 2 本文整体方案流程图

Fig. 2 Flow diagram of the overall scheme

表1 主要仿真参数列表

Tab.1 Main simulation parameters

参数	参数值	参数	参数值
调制带宽	20 MHz	白噪声功率谱密度	$10^{-21} \text{ A}^2/\text{Hz}$
发射功率	1 W	光接收器的面积	$1 \text{ cm}^2$
光响应率	0.8 A/W	滤光片增益	1
光集中器视场角	$70^\circ$	光集中器增益	1.5

本文主要研究多用户多 AP 的 VLC 网络中的整体性能与用户个体性能的均衡优化问题,前者由网络频谱利用率和能效体现,后者由用户速率公平性与时延公平性表征。本文采用比例公平性定义,如式(26)和(27):

速率公平性为:

$$F_v = \frac{\left( \sum_{n=1}^N r_n \right)^2}{N \sum_{n=1}^N r_n^2} \quad (26)$$

时延公平性为:

$$F_D = \frac{\left( \sum_{n=1}^N D_n \right)^2}{N \sum_{n=1}^N D_n^2} \quad (27)$$

其中,  $r_n$  和  $D_n$  分别是用户的实际速率与时延。

如图3所示,仿真得到在采用不同干扰管理机制情况下网络频谱利用率受到用户数量变化的影响。可以看出,网络频谱利用率会随着用户数量增多而增大,这是因为当网络中有更多用户参与调度时,AP的时隙和功率会被更加充分利用,因此更多的用户会将网络资源转化为速率,因此网络和速率会增大,在可用带宽不变的情况下网络频谱利用率就会提升。另外,本文机制在相同用户数量时相比其他算法能实现更高的频谱利用率,这是因为本文采用的是基于用户位置的 AP 协作干扰管理机制,在每个时隙调度的用户是最多数量且不产生相互干扰的,并且当网络结构即用户数量发生变化,能自适应调整 AP 协作模式,因此用户能接入最多数量的 AP,每个用户得到的速率就最大。另外,本文运用基于信道质量进行线性注水功率分配算法,这样在不同时隙依据网络实际信道情况自适应优化用户速率,所以网络和速率更大。再者,本文在自适应干扰管理与功率分配基础上,在每个时隙调度

用户时将和速率作为优先因子,这有助于优化所有时隙的网络和速率。综合来看本文算法产生的和频谱利用率相比其他对比算法会更大。

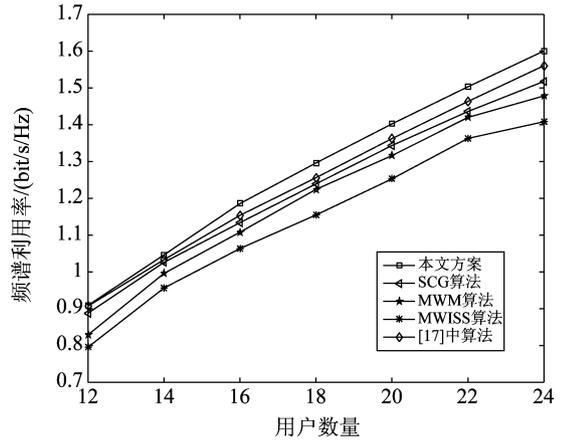


图3 不同干扰管理算法中网络频谱利用率与用户数量的关系

Fig.3 The relationship between spectrum utilization and number of users

如图4所示,仿真得到用户速率公平度与用户数量变化的关系。从仿真图中可以看出,随着用户数量增多用户速率公平度不断降低。因为在网络中的 AP 数量、位置及额定发送功率不变的情况下,用户越多,由用户的位置与信道质量引起的差异越大,故时隙分配时用户的速率差距会越大,因此用户速率的公平性会降低。本文提出的干扰管理机制产生的用户速率公平度相比其他算法会更高,这是因为,本文在每个时隙中选择的极大独立集是基于用户速率公平性的,由于要考虑信道质量的变化,当用户的速率累计得越来越大时,那么其在参与调度时,速率优先因子会减小,导致被调度的可能性降低,而累计速率更小的用户被调度的机会增大,这样所有时隙分配时,用户累计产生的速率能达到最大公平性,所以本文得到用户速率公平度会最高。另外,从仿真图中可以看出,本文算法实现的用户速率公平度降低随着用户数量增加更缓慢,即受其影响相对更小,这也是本文在干扰管理时是基于用户位置实现的,因此对用户数量变化具有一定的自适应调节能力。

如图5所示,仿真得到在不同干扰管理和用户调度机制中用户时延公平度与用户数量的关系图。可以从图中看出,随着 VLC 网络中用户数量不断增加用户时延公平度会降低,这是由于当用户增多

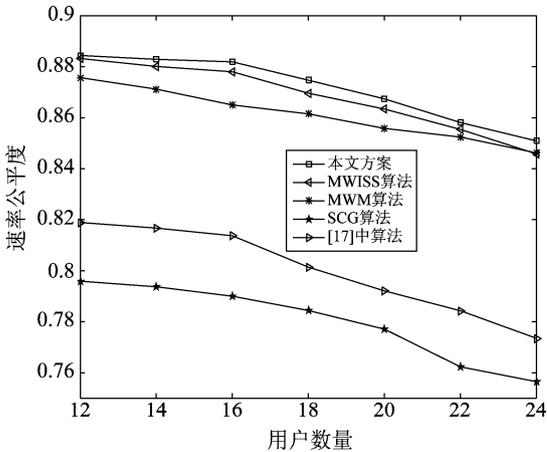


图 4 不同干扰管理算法中用户速率公平度与用户数量的关系

Fig. 4 The relationship between rate fairness and number of users

时,用户被调度的机会差异会更大,即用户越多,每个用户分配得到的时隙数量的差异会越大,这直接导致用户间的时延公平性降低。但是本文算法实现的网络用户时延公平度相比其他算法更高,因为本文是根据用户的位置使多个 AP 向交叉覆盖范围内的用户发送相同信息来消除干扰的,另外,在每个时隙进行用户调度时用户的时延作为优先因子被考虑,当用户时延增多时,其调度优先因子会更大,换言之,每个时隙时延更大的用户所在的极大独立集被选择的概率会越大,即其被调度的机会越大,因此,在所有时隙分配完成后,用户被调度的机会更加均衡,时延公平度更高,这也体现了本文方案的自适应特性。

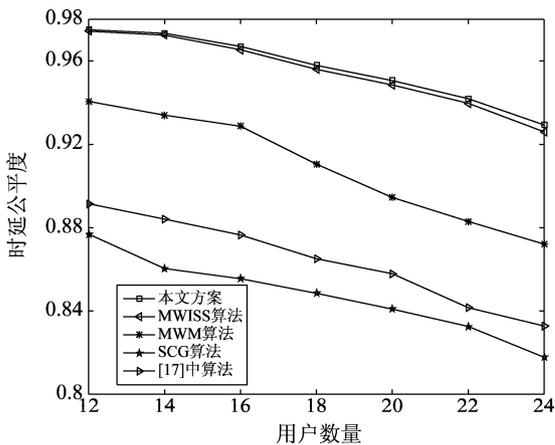


图 5 不同干扰管理算法中用户时延公平度与用户数量的关系

Fig. 5 The relationship between delay fairness and number of users

图 6 仿真得到网络频谱利用率与发送功率变化的关系。可以看出,随着发送功率的增大,网络的频谱利用率不断增大,这是因为当每个时隙网络的总发送功率增大时,在用户的数量、位置以及与 AP 之间的信道增益不变的情况下,信(干)噪比会随之增大,使得用户在被调度时的速率增大,故网络和速率会增大,带宽不变时频谱利用率随之增大。本文产生的和速率随着发送功率增大而增长得更多更快,这是本文干扰管理、功率分配算法与时隙分配机制优势的体现。首先,在干扰管理时,多个 AP 向用户发送相同信息,干扰消除,使信干噪比转换为信噪比,功率转化为速率的效益更大;为了规避信道变化对网络性能的影响,基于信道增益差异为信道自适应分配功率,使得发送功率被更加充分利用;最后,每个时隙选择极大独立集时,将和速率作为优先因子,所以调度的用户速率能得到基本保证,再加上每个时隙能调度最多的用户,所以信道上利用的功率更多,和速率更大。综上所述,本文算法对发送功率的利用效率即能效更高,随着功率增大,产生的和速率效益更大,频谱利用率也会更大。

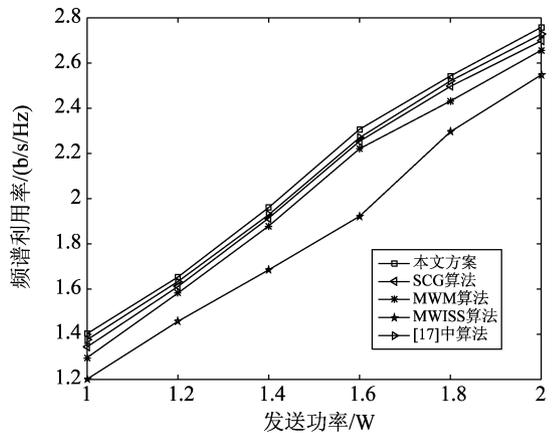


图 6 不同干扰管理算法中网络频谱利用率与发送功率的关系

Fig. 6 The relationship between spectrum utilization and power

如图 7 所示,随着发送功率的增加,能效会逐渐升高,这是由于在每个时隙总发射功率增大时,信道得到的功率会相应增大,转化的和速率会增大,所以网络能效会提升。进一步,在相同条件下,采用本文方案相比其他算法能够实现更高的能效。这种优势主要是源于本文能够在消除干扰的前提下采用优化的线性注水功率分配算法,功率按照信道质量的差异及变化自适应地分配至用户,所以功率

转化为速率的效果更好,再者本文在对用户时隙分配即在每个时隙选择用户调度时将速率作为考虑因素,这种设计有益于保障网络和速率。

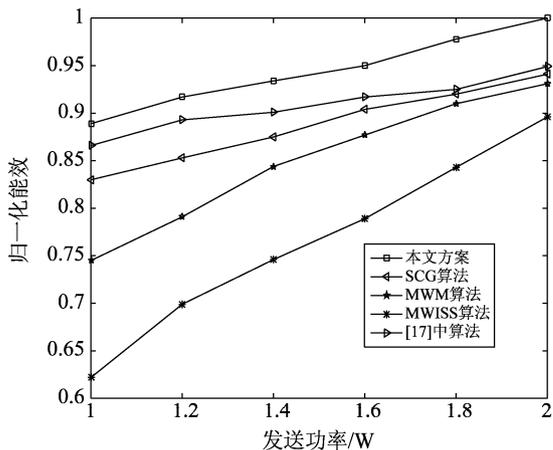


图7 不同干扰管理算法中网络归一化能效与发送功率的关系

Fig. 7 The relationship between normalized energy efficiency and power

图8 仿真得到用户速率公平度与 FoV 变化的关系。从图中可以看出,随着 FoV 逐渐变大,采用本文算法、MWM 算法和 MWISS 算法时用户的速率公平度呈现平缓上升趋势,而采用[17]中方案与 SCG 算法时逐渐下降,并且本文算法在不同 FoV 时的用户速率公平度比其他算法高。原因在于本文算法可以依据用户位置自适应调节干扰管理时 AP 协作集与时隙分配时用户调度,当 FoV 增大时,交叉覆盖范围内的用户增多,其中用户的 AP 协作集会自适应扩展,其速率会增大,但是在时隙分配时,考虑速率优先因子的极大独立集选择时,处于非交

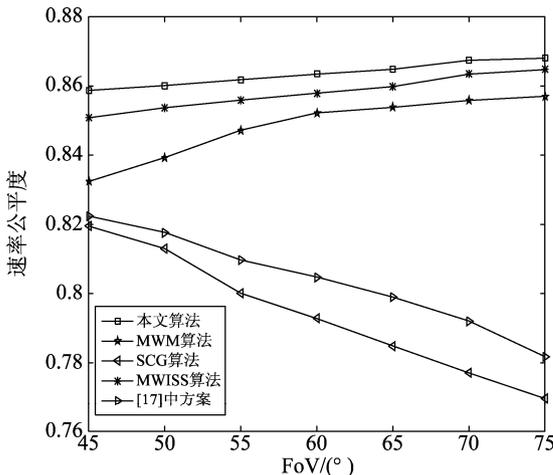


图8 不同干扰管理算法中用户速率公平度与 FoV 的关系

Fig. 8 The relationship between rate fairness and FoV

叉覆盖范围内的用户由于其调用速率更小,所以速率优先因子更大,进而使所在的极大独立集被选中的机会更大,即此用户被调度的可能更大,所以不同位置的用户速率变得相对平衡,即本文算法可以更好地规避由 FoV 变化产生的影响,并且实现更高的速率公平性。

### 7 结论

本文研究 VLC 网络中高效的干扰管理与优化资源分配机制,提出了一种基于图论中极大独立集兼具优化时隙分配与功率分配的自适应干扰管理机制,通过与其他算法对比仿真可得,本文算法在网络频谱利用率、能效、速率公平性与时延公平性上有明显优势,并且还能随着用户数量、位置与信道变化进行自适应调节,以更好地保障网络性能。本文主要针对整个网络采用中央集中控制的方式对 AP 与用户之间的链路进行调度,下一步将考虑引入人工智能方法对分布式控制方式进行探讨。

### 参考文献

- [1] Jovicic A, Li Junyi, Richardson T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 26-32.
- [2] Li X, Zhang R, Lajos H. Optimization of visible-light optical wireless systems: network-centric versus user-centric designs[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1878-1904.
- [3] Haas H, Yin Liang, Wang Yunlu, et al. What is LiFi? [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(6): 1533-1544.
- [4] Karunatilaka D, Zafar F, Kalavally V, et al. LED based indoor visible light communications: state of the art[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [5] Romero-Munoz G A, Kim K, Lee K. Enhanced inter-lighting interference cancellation using power control to improve the performance of indoor visible light communication systems[J]. IET Optoelectronics, 2018, 12(6): 273-279.
- [6] 王春喜, 营春晓, 刘洛琨, 等. 基于用户体验的 VLC/WiFi 异构网络切换算法[J]. 信号处理, 2017, 33(9): 1191-1198.  
Wang Chunxi, Jian Chunxiao, Liu Luokun, et al. QoE-Based Handover Scheme for Indoor VLC-WiFi Heteroge-

- neous Systems[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(9): 1191-1198. (in Chinese)
- [7] Kazemi H, Safari M, Haas H. Bandwidth Scheduling and Power Control for Wireless Backhauling in Optical Attocell Networks[C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2018: 1-7.
- [8] Al-Ahmadi S, Maraqa O, Uysal M, et al. Multi-user visible light communications: State-of-the-art and future directions[J]. IEEE Access, 2018, 6: 70555-70571.
- [9] 张晓珂. 室内可见光通信网络中的多用户接入和干扰管理技术[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017. Zhang Xiaoke. The Multi-user Access and Interference Management for Indoor Visible Light Communication Networks[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [10] Kizilirmak R C, Narmanlioglu O, Uysal M. Centralized light access network (c-liAN): A novel paradigm for next generation indoor VLC networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 19703-19710.
- [11] Abdelhady A M, Amin O, Chaaban A, et al. Downlink resource allocation for dynamic TDMA-based VLC systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 108-120.
- [12] Chen Yong, Li Shaoju, Liu Huanlin. Dynamic Frequency Reuse Based on Improved Tabu Search in Multi-user Visible Light Communication Networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 35173-35183.
- [13] Yang Zhaohui, Xu Wei, Li Yiran. Fair non-orthogonal multiple access for visible light communication downlinks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 6(1): 66-69.
- [14] Zhang Xiaoke, Gao Qian, Gong Chen, et al. User grouping and power allocation for NOMA visible light communication multi-cell networks [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 21(4): 777-780.
- [15] Demir M S, Miramirkhani F, Uysal M. Handover in VLC networks with coordinated multipoint transmission[C]//IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). IEEE, 2017: 1-5.
- [16] 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, 2017, 36(1): 136-148.
- [17] Obeed M, Salhab A M, Zummo S A, et al. Joint power allocation and cell formation for energy-efficient VLC networks[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018: 1-6.
- [18] Li Chen, Wang Weidong, Zhang Chi. Coalition formation for interference management in visible light communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 7278-7285.
- [19] Li Xuan, Jin Fan, Zhang Rong, et al. Users first: User-centric cluster formation for interference-mitigation in visible-light networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 15(1): 39-53.
- [20] Chen Yan, Kelly A E, Marsh J H. Improvement of indoor VLC network downlink scheduling and resource allocation [J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26838-26850.
- [21] Huang Xin, Fu Xuequn, Xu Wei. Incremental scheduling scheme for indoor visible light communication [J]. Electronics Letters, 2015, 51(3): 268-270.
- [22] Zhang Zaichen, Dang Jian, Wu Liang, et al. Optical Mobile Communications: Principles, Implementation, and Performance Analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 471-482.
- [23] 张冬梅, 徐友云, 蔡跃明. OFDMA 系统中线性注水功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1286-1289. Zhang Dongmei, Xu Youyun, Cai Yueming. Linear water-filling power allocation algorithm in OFDMA system [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1286-1289. (in Chinese)

### 作者简介



**高龙龙** 男, 1994 年生, 湖北安陆人。重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为可见光通信网络中的干扰管理与性能优化。

E-mail: 2971852235@qq.com



**谢显中** 男, 1966 年生, 四川通江人。博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为可见光通信、干扰对齐、认知无线电等。

E-mail: xiezh@cqupt.edu.cn



**卢华兵** 男, 1987 年生, 重庆人。重庆邮电大学博士生, 主要研究方向为可见光通信、NOMA。

E-mail: 526147604@qq.com