

# 以用户为中心的可见光通信协作传输中 训练资源分配算法

徐文艳\*, 于宏毅, 杨森

战略支援部队信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450001

**摘要** 以用户为中心的可见光通信协作传输是近年来出现的新架构,这导致虚拟小区之间出现重叠。为避免导频污染问题,每个虚拟小区中的光接入点(AP)或者虚拟小区中选择相同 AP 的用户发送的训练序列应该是正交的。针对可见光通信中以用户为中心的协作网络,研究训练资源的正交分配问题,提出了一种新的导频分配算法,联合导频分配和用户选择问题,以期最大限度地增加虚拟小区内可被接入的用户数。分析和仿真结果表明,该导频分配方案可以有效改善导频污染问题,提高训练资源利用率,并且相比已有的导频分配方案,性能有所改进。

**关键词** 光通信; 可见光通信; 导频污染; 训练资源分配; 以用户为中心; 协作传输

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.010601

## Training Resource Allocation for User-Centric Visible Light Communication Cooperation Transmission

Xu Wenyan\*, Yu Hongyi, Yang Sen

PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China

**Abstract** User-centric applications through visible light communication cooperative transmission constitute an architecture that has emerged in recent years. The resulting user-dependent cooperative clusters are observed to inevitably overlap. The training signals transmitted from the access points (APs) in each cluster or from the users who select identical APs in their clusters should be mutually orthogonal to avoid pilot contamination. Herein, we study the orthogonal training resource allocation problem for user-centric cooperative networks. Further, we formulate a joint pilot allocation and the user equipment (UE) selection problem to maximize the number of admitted UE with a fixed number of pilots. Finally, the analysis and numerical results denote a remarkable improvement when compared with the existing scheme and denote that the proposed method can effectively avoid pilot contamination and improve the utilization of training resources.

**Key words** optical communications; visible light communication; pilot contamination; training resource allocation; user-centric design; cooperation transmission

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 070.6020; 200.2605

## 1 引言

可见光通信(VLC)<sup>[1-3]</sup>具有未授权频谱、大带宽、高效节能照明等特点,近年来发展迅猛。除了多重优势外,VLC系统还存在一些缺陷,在非视线场景中性能下降,与无线电蜂窝网络相比覆盖范围较

小。当用户随机分布时,室内VLC网络中的每个用户在特定位置可能会接收到来自多个光接入点(APs)的视距信号,这些信号相互叠加,小区边缘的小区间干扰(ICI)比较严重,会给用户的正常通信造成干扰,导致用户接收性能显著降低。针对上述问题,近年来提出以用户为中心的设计理念<sup>[4]</sup>,无论用

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-06-05; 录用日期: 2019-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(61671477)

\* E-mail: flower\_xu1983@163.com

户位于何处,其服务质量(QoS)需求都可以得到满足。以用户为中心的 VLC 网络,其特点是 APs 跟随用户,而不是用户跟随 APs。对于这种新型网络,每个用户可以选择若干个 APs 组成一个虚拟小区,APs 可以通过多输入多输出(MIMO)技术将信息联合传输到用户终端,多个用户终端具有不同的 QoS 要求和信道条件,对 APs 的选择也会不同,这会导致小区之间的重叠。

APs 协作传输性能很大程度受信道状态信息(CSI)获取程度的影响,对于时分双工(TDD)通信系统,可以通过 APs 向用户发送训练序列进行信道估计以获取 CSI。对于多小区通信系统,同一小区 APs 发送的训练序列或选择相同 AP 的用户发送的训练序列应该是相互正交的。对于非重叠虚拟小区,为小区内用户分配一组正交的导频序列,小区间复用一组相同的正交导频序列集合即可。然而,以用户为中心的网络中,虚拟小区是重叠的,重叠虚拟小区间的重叠 APs 同时服务于多个用户终端,导致严重的导频污染问题。为了满足所有虚拟小区的需求,可以为每个 AP 或每个用户终端分配一个正交的训练资源,但是总体训练开销随 APs 或用户终端总数的增加而线性增加,这会抵消合作收益,导致净吞吐量降低。此外,也可以通过合理设计 APs 或用户之间的训练资源重用方案,减少训练开销。

目前,针对训练资源重用的研究,在大规模 MIMO 系统中得到了广泛的重视<sup>[5-10]</sup>,主要研究了训练序列的设计、功率分配等,主要针对多输入单用户(MISO)系统,所提方案主要是将相同的导频资源分配给不同区域的用户。对于以用户为中心的协作方案,Chen 等<sup>[11]</sup>提出了一种训练导频分配方案,该方案基于图着色算法,比如 D<sub>sat</sub> 算法,目标是在一定的实际约束条件下,给用户分配最少数目的导频序列,以降低训练开销,然而系统相干时间是一定的,导频长度受信道相干时间限制,分配给用户训练的导频序列是固定的。本文针对以上问题,将导频分配和用户选择联合考虑,在导频序列固定的情况下,动态考虑分配方案,最大限度地增加可接入用户数。具体来说,首先根据 D<sub>sat</sub> 算法找到 VLC 网络需要的最小数量的导频序列,其次分别讨论当用户数量多于或者少于最小导频序列数量时,如何对训练资源进行优化分配,最后对比现有算法以及传统分配算法。仿真结果表明,本文所提方案能接入更多的用户终端,训练资源利用率更高,性能

较优。

## 2 系统模型

本节针对室内 VLC 系统的一个光小区,假设有  $J$  个 APs 同时向  $K$  个用户广播信息,使用常见的脉冲幅度调制(PAM)作为调制方式。由于光信号的广播特性,小区用户的干扰主要来自于小区内干扰和小区间干扰。

### 2.1 光高斯信道模型

假设室内 VLC 系统中发光二极管(LED)符合朗伯光源模型,直射信道的直流增益  $h$ <sup>[12]</sup> 可以表示为

$$h = \begin{cases} \frac{A}{d^2} R_0(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $A$  为光接收机面积; $R_0(\varphi)$  为发光强度; $d$  为 LED 与用户接收机之间的距离; $\varphi$  为 LED 灯光的发射角; $\psi$  为光信号在光接收机处的入射角; $\psi_c$  为光接收机的视场角(FOV); $T_s(\psi)$  为光学滤波器增益; $g(\psi)$  为聚光器增益,可以表示为

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{\kappa^2}{\sin^2 \psi}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\kappa$  为折射率。

VLC 系统中,采用强度调制/直接检测(IM/DD)方案对信号进行调制和检测,瞬时辐射光功率由信号幅值决定,因此信号是实值且是非负的。此外,为眼睛的安全考虑,信号也受到平均光功率的限制。因此,IM/DD 信道通常被建模为加性高斯白噪声信道<sup>[13]</sup>,经典的香农公式在 VLC 系统中已经不适用。但是,输入信号带有幅度约束,目前还没有关于此种信号信道容量的精确封闭表达式,只能用紧容量边界来接近信道容量。信道容量近似用下界<sup>[14]</sup>表示为

$$C = \frac{1}{2} B \log_2 \left( 1 + \omega \frac{\rho^2 P_r^2}{\sigma^2} \right), \quad (3)$$

式中:常量  $\omega = e/2\pi$ ;  $\rho$  为光电探测器(PD)的转换因子; $B$  为调制带宽; $P_r$  为接收的光功率; $\sigma^2$  为高斯噪声功率。该表达式在高信噪比条件下非常简单而且特别精确,它与参考文献[12]的上界表达式重合。需要注意的是,由于 VLC 系统的约束条件不同,信道容量与香农公式容量表达式的区别在于存在因子  $1/2$ 。

## 2.2 VLC-MIMO 系统模型

在传统的协同网络中,网络为固定位置提供覆盖,为了提高频谱效率,从网络的角度形成虚拟小区,这些小区是非重叠的<sup>[15]</sup>,小区配置通常是固定的,网络资源按照预先设置的算法分配给用户。而以用户为中心的网络,是从每个用户的角度形成的,以确保 QoS。而小区的形状通常是不规则的,这不可避免地会导致小区之间网络的重叠。

本文使用以用户为中心的协作传输模式,每个用户根据自己的 QoS 需求和信道条件选择几个 APs 组成一个虚拟小区。如图 1 所示,假设用户、AP 分别用  $k, j$  表示,对应的集合分别是  $N_U, N_A$ ,  $K$  个用户终端分布在虚拟小区  $C$  中。对于用户  $k$ ,信道矩阵记为  $\mathbf{H}_k = [h_{k,1}, h_{k,2}, \dots, h_{k,j}]^T$ ,  $h_{k,j}$  表示用户  $k$  和 AP  $j$  之间的信道增益。此外,用户所需的非负训练信号向量记为  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_j]^T$  ( $T$  表示转置),对传输信号均值进行归一化处理,  $E[x_j(t)] = 1 (j \in N_A)$ 。假设 AP 对用户  $k$  的预编码矩阵为  $\mathbf{W}_k = [\omega_{j,1} \omega_{j,2} \dots \omega_{j,k}]^T, \forall j \in N_A$ , 用户  $k$  选择若干个 APs 为其服务,所在虚拟小区  $C_k \subseteq C$ , 用户  $i$  所在虚拟小区  $C_i \subseteq C, C_k \cap C_i \neq \emptyset, k, i \in N_U, k \neq i$ , 以用户为中心的协作方式,对于不同的 QoS 需求和信道条件,用户  $k, i$  的虚拟小区可能是重叠在一起的,即每个 AP 可能属于不同的虚拟小区。为避免大量的信令开销,最理想的情况是 AP 建立的连接具有平均信道增益。为了便于下行传输,APs 信道信息假设通过 TDD 通信方式获取正交训练资源,对于某一个时隙,用户  $k$  接收的信号  $y_k$  可以表示为

$$y_k = \sum_{j=1}^J \sqrt{p_f} h_{k,j} \omega_{j,k} x_k + n_k, \quad (4)$$

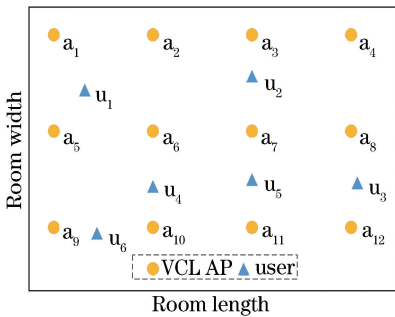


图 1 室内 VLC AP 布局以及用户在水平面投影示例

Fig. 1 Indoor VLC AP layout and user projection example on horizontal plane

式中:  $p_f$  表示用户终端导频的发射功率;  $n_k$  表示高斯白噪声;  $\omega_{j,k}$  表示用户的预编码。

传统的导频信号分配下,第  $k$  个用户的下行信号干扰噪声比为

$$R_{\text{SINR}} = \frac{|h_{k,j} \omega_{k,j}|^2}{\sum_l |h_{k,l} \omega_{k,l}|^2 + |n_k|^2 / p_f}. \quad (5)$$

当 AP 数量足够多时,假设极端情况,  $J$  趋于无穷大,有

$$R_{\text{SINR}} \rightarrow \frac{h_{k,j} \omega_{k,j}}{\sum_l h_{k,l} \omega_{k,l}}, \quad (6)$$

式中:  $\omega_{k,l} = \lim_{J \rightarrow \infty} \frac{|\omega_{k,l}|^2}{J}$ ;  $l$  是除  $j$  以外的其他 AP。

从(5)式可以看出,当 AP 足够多时,噪声的影响可以忽略不计,然而,小区域干扰即导频污染并没有消失,导频污染的存在是制约 VLC-MIMO 系统性能提升的一个瓶颈。

## 3 导频分配

虚拟小区之间的重叠使得多个 APs 的导频资源分配无法解耦。在这一部分,本文提出了导频资源分配方法,针对以用户为中心的设计理念,将用户选择与导频资源分配联合考虑,目标是最大限度地增加虚拟小区可接入的用户终端数。

### 3.1 问题形成

对于同一个小区内的用户终端,传统的 TDD 通信系统应该分配正交导频序列来进行区分。假设虚拟小区中每个用户获取平均信道增益,这种约束用数学方法表示为

$$C1: \mathbf{x}_{\pi_k}^H \mathbf{x}'_{\pi_i} = 0, k, i \in N_U, k \neq i, \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{x}_{\pi_k}, \mathbf{x}_{\pi_i}$  分别表示用户  $k, i$  获取的训练序列。比如图 1 中, AP5 联合服务于 user1 和 user4, 则有  $\mathbf{x}_1^H \mathbf{x}_4 = 0$ 。

其次,为了减少信道估计误差,每个训练信号的重用次数应限制在预定义值以下,即

$$C2: n_x \leq n_{\max}, \quad (8)$$

式中:  $n_x$  表示训练序列  $\mathbf{x}$  可被共享的用户终端数目;  $n_{\max}$  表示每个训练信号的最大重用次数,它是根据实际干扰环境等可以预先确定的参数。C2 约束条件表示通信时应该公平地重用训练信号,以避免出现一个训练信号被多次重用,而空着几个训练序列是为了避免这种极端的情况出现,这种极端情况一旦出现就意味着系统性能恶化。

考虑到可见光信道容量被可用带宽限制,故每个信道受 LED 功率限制,而且需要满足节能要求以及室内用户用眼安全的系统要求,故根据可见光信道的

特点,VLC系统需要满足两个约束条件,即

$$C3: \sum_{j \in N_A} P_j \leq P_t, \quad (9)$$

$$C4: P_{\min} \leq P_j \leq P_{\max}, \forall j \in N_A, \quad (10)$$

式中: $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ 分别为AP最小、最大光功率; $P_t$ 为所有AP总功率。

本文的目标是找到重用训练信号的最大用户终端数目,因此将目标函数定义为

$$P_1: \max |M| \text{ s.t. } C1, C2, C3, C4. \quad (11)$$

问题 $P_1$ 可以认为是训练资源分配问题,一般来说很难解决,它通过穷举搜索法可以得到最优解,检查所有可能的分配方案,在满足以用户为中心的约束条件下,接入用户终端最多的分配方案。但是,穷举搜索法的复杂度随用户终端数量呈指数级增长,该方法并不实用。下面结合实际提供一种低复杂度的分配方案。

### 3.2 导频分配方案

约束条件C1假设用二进制矩阵 $\mathbf{A}$ 来表示,矩阵 $\mathbf{A}$ 中 $k$ 行 $i$ 列可表示为

$$a_{k,i} = \begin{cases} 1, & \text{if } C_k \cap C_i \neq \emptyset, k \neq i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (12)$$

(12)式说明,当任意两个用户被至少一个AP服务时, $\mathbf{A}$ 中元素应该是1,并且应给这两个用户分配不同的导频序列;否则,元素为0,用户可以共享

同一个导频序列。基于矩阵 $\mathbf{A}$ ,可以构造无向图来描述约束条件C1即任意两个用户之间的关系,其中任意两个用户至少有一个公共AP来提供服务,而且它们之间是相互连接的。对于图1中的网络,对应的无向图如图2所示,其中如果有任意两个用户由共同的AP服务,则这两个用户相互连接。使用经典图着色算法——Dsaturn算法<sup>[11]</sup>,目的是对于给定的一组用户,在相同的约束条件下,用最少数量的不同颜色对图形顶点进行着色。对于图2(a)中的无向图,采用文献[11]中为以用户为中心分配训练资源设计的算法,着色结果如图2(b)所示。在本例中,所需颜色(导频序列)的最小数量是3,该算法复杂度低,然而给定了导频序列,如何将导频分配方案与用户选择结合在一起,最大限度地接入用户数目,还需要进一步研究。

首先采用文献[11]中为以用户为中心训练资源分配的Dsaturn算法找到满足约束条件的最小训练数的颜色数量,如果所需导频序列的最小数量大于可用导频序列的数量,则应该移除一部分用户,反之,所有的用户都可以分到导频序列,但是导频序列分配的结果可能是一些没有分给用户使用,一些被重用了多次,这在一定程度上也浪费了训练资源,这种情况下,可以重新分配,以减少导频污染。分别对这两种情况进行讨论。

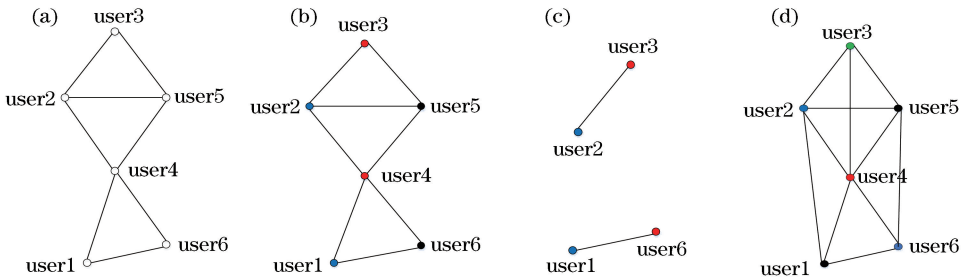


图2 图1网络对应不同情形的无向图。(a)图1所示的网络无向图,顶点表示任意两个用户由同一个AP服务;(b)应用Dsaturn算法后的着色图<sup>[9]</sup>;(c)导频不足时重新分配结果;(d)导频充足时重新分配结果

Fig. 2 Undirected graphs in different situations correspond to network in Fig. 1. (a) Undirected graph of network shown in Fig. 1, where the vertexes denote any two UEs share the same AP with each other; (b) colored graph after applying the Dsaturn algorithm<sup>[9]</sup>; (c) reallocation result when pilots are insufficient; (d) reallocation result when pilots are sufficient

本文假设将 $\tau$ 个序列用于导频分配,且有 $\tau < K$ , $\tau$ 小于网络中的用户终端总数 $K$ ,假设可用的序列集合为 $T = \{1, 2, \dots, \tau\}$ ,使用了Dsaturn算法后所需的导频序列数量假设为 $n^*$ 。

#### 3.2.1 导频不足

终端数目大于能够使用的训练序列数目,这种情况下,一些用户终端应该被调度走,所需的最小数

量的导频序列才能被满足。假设 $\theta_k = \sum_{k \neq i, i \in N_U} a_{k,i}$ 表示虚拟小区中用户 $k$ 所连接的不同用户的总数。一般来讲,连接最多的用户,即 $\theta_k$ 值最大时,该用户应该被移除,因为与用户 $k$ 相连的在同一个虚拟小区内的用户需要使用不同的正交训练资源,这就需要增加训练序列数量。然而如果不同的小区 $\theta_k$ 值相同,系统随机移除某一个用户可

能会导致系统性能变低。直观来讲,引入最高导频污染的用户应该被移除。为此,当任意两个互不关联的用户之间分配了相同的训练序列时,给出一个定义<sup>[16]</sup>  $\xi_{k,i}$  来度量导频污染程度,表达式为

$$\xi_{k,i} = \log_2 \left( 1 + \frac{\sum_{j \in C_{k'}} h'_{j,k}}{\sum_{j \in C_k} h'_{j,k}} \right) + \log_2 \left( 1 + \frac{\sum_{j \in C_k} h'_{j,i}}{\sum_{j \in C_{k'}} h'_{j,i}} \right), \quad (13)$$

式中:  $h'_{j,k}$ ,  $h'_{j,i}$  表示用户  $k, i$  所在虚拟小区之外的信道增益,即簇外信道增益,  $\{h'_{j,k}, \forall j \in C \setminus C_k, k \in N_U\}$ 。显然,当用户  $k$  和  $i$  使用相同导频序列时,  $\xi_{k,i}$  值越大意味着导频污染越严重。然后,定义  $\eta_k = \sum_{i \in N_U \setminus \{k\}} \xi_{k,i}$ , 表示当上述问题存在时导频的污染程度。  $\eta_k$  值大的用户,应该被移除。

基于此,在算法中提供一个用户选择和导频序列重新分配过程。导频不足时训练资源分配算法步骤如下。

1) 初始化矩阵  $\mathbf{A}$ , 用户集合为  $N_U = \{1, 2, \dots, k\}$ , 所需要的导频序列初始数量为从 Dsaturn 算法获得的  $n^*$  值。

2) 当  $n^* > \tau$  时, 找到  $k^* = \arg \max_{k \in N_U} \theta_k$ , 如果  $\theta_k$  有一个以上的值, 调度  $\xi_k$  最大的用户。

3) 从用户集合  $N_U$  中移除  $k^*$ ,  $N_U = N_U \setminus k^*$ , 从现有的用户集合  $N_U$  中更新矩阵  $\mathbf{A}$ 。

4) 用矩阵  $\mathbf{A}$  和集合  $N_U$ , 使用 Dsaturn 算法计算  $n^*$ 。

通过使用上述算法, 在图 1 中  $\tau = 2, n_{\max} = 2$  的网络中, 用户选择和训练序列分配结果如图 2(c) 所示, 所接入的用户数目是 4。

### 3.2.2 导频充足

当  $n^* < \tau$  时, 用户只分配部分导频序列, 然而所有可用的训练序列应该尽可能地使用, 才能尽可能地减少导频干扰。比如, 图 2(b) 中使用了三个训练序列, user1 和 user2 距离不远, 它们之间很可能存在导频污染, 同样 user3 和 user4 之间及 user5 和 user6 之间也都可能存在导频干扰。当有 4 个可用的导频序列时, 可以充分利用并重新分配导频序列来解决这个问题。比如在图 2(d) 中, 当有 4 个导频时, 每一对用户都可以分配不同的导频, 因此导频污染在一定程度上得到了缓解。

根据  $\xi_{k,i}$  的定义,  $\xi_{k,i}$  值大意味着当给 user  $k$  和 user  $i$  分配同样的导频序列时, 它们之间导频污染严重。即应给  $\xi_{k,i}$  值大的用户对分配不同的导频序列, 或者让这两个用户相互连接, 组成新的虚拟小区。对于  $\xi_{k,i}$  值小的用户对, 可以使用相同的导频序列。假设  $\xi_{th}$  为阈值,  $\xi_{th}$  决定两个用户是否可以重用同一个导频序列, 具体来说, 当  $\xi_{k,i} > \xi_{th}$  时, 不能重用, 反之, 可以重用。显然, 当  $\xi_{th}$  值很小时, 更多的用户终端相互连接, 此时需要更多的正交训练序列, 在极端的情况下, 当  $\xi_{th} < \min\{\xi_{k,i}\}$  时, 所有的用户相互关联一起, 所需要的导频序列数目等于用户数目  $K$ 。另一方面, 当  $\xi_{th}$  值很大时, 用户连接数目减少, 所需的正交训练序列数目也减小。极端的情况, 当  $\xi_{th} > \max\{\xi_{k,i}\}$  时, 在这种情况下, 如果没有共享相同的 AP, 这对用户将不会彼此关联, 此时, 所需要的训练序列数目等于  $n^*$ 。正如假设的  $\tau < K$ , 即至少要有有一个  $\xi_{th}$  在  $\min\{\xi_{k,i}\}$  和  $\max\{\xi_{k,i}\}$  之间, 所需的导频序列数等于  $\tau$ , 因此可以使用二分搜索法找  $\xi_{th}$ , 从而找到  $\tau$ , 具体步骤如下。

1) 初始化下界  $\xi_{th, LB} = \min\{\xi_{k,i}\}$ , 上界  $\xi_{th, UB} = \max\{\xi_{k,i}\}$ , 利用 Dsaturn 算法获取训练序列数量  $n^*$ 。

2) 当  $n^* \neq \tau$  时, 令  $\xi_{th} = \frac{\xi_{LB} + \xi_{UB}}{2}$ , 更新(12)式中矩阵  $\mathbf{A}$ , 利用 Dsaturn 算法来计算  $n^*$  和  $\mathbf{A}$ 。

3) 如果  $n^* > \tau$ , 令  $\xi_{th, LB} = \xi_{th}$ ; 如果  $n^* < \tau$ , 令  $\xi_{th, UB} = \xi_{th}$ 。

### 3.3 复杂度分析

下面对提出的用户关联方案和训练资源分配进行复杂性分析, 算法 1 为导频不足时算法, 算法 2 为导频充足时算法。Dsaturn 算法的计算复杂度为  $O(M^2)$ <sup>[11]</sup>, 第一种情况, 算法 1 中的用户选择算法要求 Dsaturn 算法最多执行  $M$  次才能找到最终被认可的用户关联集合, 因此, 总的复杂度为  $O(M^3)$ 。第二种情况, 当  $\xi_{th}$  落到一个特定的区域  $[a, c]$  时, 从 Dsaturn 算法中计算出的所需导频序列的数目  $n^* = \tau$ , 因此, 当  $\xi_{th, UB} - \xi_{th, LB} < c - a$  时, 3.2 节所提算法停止, 故此算法所需要的最大迭代次数的上界是  $\log_2 [|\max\{\xi_{k,i}\} - \min\{\xi_{k,i}\}| / (c - a)]$ , 算法 2 的复杂度为  $O[M^2 \log_2 (|\max\{\xi_{k,i}\} - \min\{\xi_{k,i}\}| (c - a))]$ 。

## 4 仿真分析

对所提出的导频分配方案的性能进行评估。假设房间大小为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ , 室内用户随机分布, 假设用户接收机 FOV 均相同, 仿真参数见表 1。

仿真中采用均方误差(MSE)信道估计算法,对于小房间,导频复用次数最多可以为2,即 $n_{\max}$ 为2。下面的结果是通过300个独立实验得到的。将本文算法与传统导频分配算法,以及Dsatur算法<sup>[11]</sup>进行比较。

表1 仿真参数  
Table 1 Simulation parameters

Parameter	Content
Cell number	6
The maximum optical power of each AP	20 W
The minimum optical power of each AP	2 W
The pilot power	200 mW
The maximum reuse time for each pilot	2
The bandwidth of LED	20 MHz
LED array size	0.1 m×0.1 m
Number of LED chips per array	36
LED beam angle	120°
LED conversion factor	0.44 W/A
PD physical area	1 cm <sup>2</sup>
PD responsivity	0.54 A/W
PD field of view (FOV)	60°
Optical filter gain	1
Refractive index of the concentrator	1.5

导频序列数目与可接入用户终端关系如仿真图3所示,可以看出,无论哪种算法,用户数目均随着导频数目的增加而增加,但是随着 $\tau$ 的增加,性能开始收敛。当导频比较充足时,本文算法与Dsatur算法相比,几乎在整个 $\tau$ 内性能相同,两种算法都可以满足用户需求。而当 $\tau > 4$ 时,本文所提算法明显优于文献中导频不足时的算法,因为Dsatur算法是在不考虑导频干扰的情况下随机移除用户,而本文算法则是移除了引入最高导频污染的用户。从图3中也能看到,传统的导频分配方案性能最差,因为传统分配方案是将导频序列随机分配给用户,而且没有导频复用。

仿真图4表明了用户可以关联的AP数目与可接入用户终端数目关系,假设每个用户选择其最近的 $m$ 个APs组成虚拟小区为其提供服务。当 $\tau = 8$ 时,从图4可以看出所有算法中用户数值都随着小区内AP的增多先增加再减少,增加的原因是随着APs的增加,可供连接的信道数增加,可以接入更多的用户数。然而增加到一定数目时,会有更多的用户终端相互连接,在这种情况下,根据本文算法,会移除一些用户,以满足约束条件C1、C2,所以接入用户数接近饱和状态后反而下降了。因此考虑信道估计过程时,比较大的虚拟小区可能会降低系统性

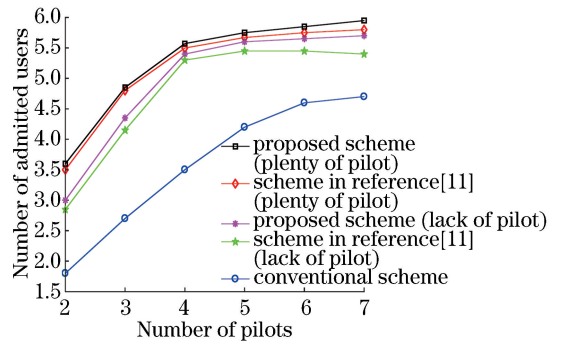


图3 导频序列数目 $\tau$ 与可接入用户终端数目关系

Fig. 3 Number of admitted users versus number of pilots  $\tau$

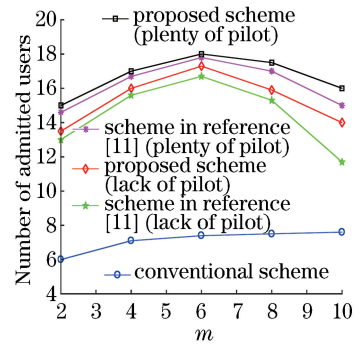


图4 用户可关联AP数目 $m$ 与可接入用户终端数目关系

Fig. 4 Number of admitted users versus  $m$

能,因此需要进一步对小区大小进行适当优化。从图4中也能清晰看出,当 $m < 6$ 时,系统性能差距不大,原因是当虚拟小区尺寸较小时,需要的训练序列较少,导频干扰也会小一些,故而系统性能相差不大,而当虚拟小区较大时,由于本文算法增加了训练序列重新分配步骤,因此性能更优。

仿真图5再次验证本文所提算法的性能优势。系统可以接入的用户数随着导频发射功率的增加均增大,但是通过发射导频功率提升的用户数目是有限的,当导频功率增加到一定程度,接入用户数会达到饱和。传统导频分配方案性能最差,是因为导频的随机分配带来的导频污染最为严重。

在信道估计中产生的MSE与室内接入APs数目之间的关系如图6所示,可以看到,系统进行信道估计产生的MSE与APs接入数目成正比,随着可以提供服务的APs的增加,MSE也增大,是因为VLC系统受导频污染影响的程度也增大。此外,传统导频方案下产生的MSE最大,原因是随机分配导频时,相邻小区边缘区域导频污染最为严重,而本文所提出的导频分配方案能有效减小导频污染,故而性能更优。

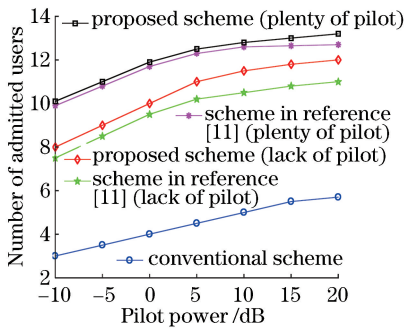


图5 可接入用户数随导频发射功率变化趋势

Fig. 5 Number of admitted users versus pilot emission power

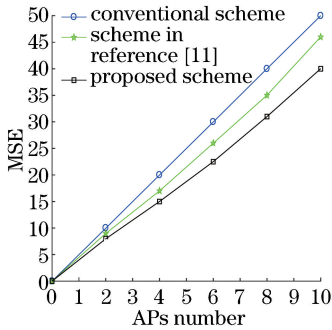


图6 MSE与接入APs数目关系

Fig. 6 MSE versus number of APs

## 5 结论

本文对VLC中以用户为中心的协作传输中导频资源的分配进行了分析研究,优化了用户选择与导频分配问题,在导频序列有限的情况下,最大限度地增加虚拟小区内的用户数,分别讨论了导频不足以及导频充足时的分配优化方法。仿真表明,与现有的一些算法相比,所提算法可以增加接入用户终端数目。在仿真中也发现,当考虑信道估计时,增加虚拟小区内APs个数可能不会显著提高系统性能,因此协作传输时需要考虑虚拟小区的大小。

### 参考文献

- [1] Cailean A M, Mihai D M. Current challenges for visible light communications usage in vehicle applications: a survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2681-2703.
- [2] Chi N, Lu X Y, Wang C, et al. High-speed visible light communication based on LED [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0300001. 迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于LED的高速可见光通信[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0300001.
- [3] Zhao L, Peng K. Optimization of light source layout

in indoor visible light communication based on white light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0706001.

赵黎, 彭恺. 基于白光发光二极管的室内可见光通信光源布局优化 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0706001.

- [4] Li X, Zhang R, Hanzo L. Optimization of visible-light optical wireless systems: network-centric versus user-centric designs [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 1878-1904.
- [5] Song X L, Yang L, Du J L. Pilot decontamination in massive MIMO system combining time-shifted and cell sectorization pilot assignment [J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(2): 165-172. 宋新雷, 杨霖, 杜嘉良. 联合时移和空间划分方法抑制大规模MIMO导频污染[J]. *通信学报*, 2017, 38(2): 165-172.
- [6] Feng W J, Li L, Dai C L. Pilot allocation based on matched game for massive multiple-input multiple-output systems [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2019, 53(3): 327-333. 冯文江, 李乐, 代才莉. 大规模多输入多输出系统中基于匹配博弈的导频分配算法[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(3): 327-333.
- [7] Zhang H Y, Zhu Y J, Zhang Y Y. Multiple-input multiple-output channel decorrelation technique for visible light communication based on normal vector tilting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0506001. 张海勇, 朱义君, 张艳语. 基于法向量倾斜的可见光通信多输入多输出信道解相关技术[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0506001.
- [8] Yin H F, Cottatellucci L, Gesbert D, et al. Robust pilot decontamination based on joint angle and power domain discrimination [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(11): 2990-3003.
- [9] Zhu X D, Dai L L, Wang Z C. Graph coloring based pilot allocation to mitigate pilot contamination for multi-cell massive MIMO systems [J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(10): 1842-1845.
- [10] Pan C H, Mehrpouyan H, Liu Y W, et al. Joint pilot allocation and robust transmission design for ultra-dense user-centric TDD C-RAN with imperfect CSI [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2038-2053.
- [11] Chen Z L, Hou X Y, Yang C Y. Training resource allocation for user-centric base station cooperation networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular*

- Technology, 2016, 65(4): 2729-2735.
- [12] Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- [13] Yang Y, Zhang J K, Liu B, et al. Study of the impact of LED nonlinearity on orthogonal frequency division multiplex based visible light communication systems[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(8): 0805007.  
杨宇, 张建昆, 刘博, 等. LED非线性对基于正交频分复用可见光通信系统的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0805007.
- [14] Lapidoth A, Moser S M, Wigger M A. On the capacity of free-space optical intensity channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(10): 4449-4461.
- [15] Papadogiannis A, Gesbert D, Hardouin E. A dynamic clustering approach in wireless networks with multi-cell cooperative processing [C]//2008 IEEE International Conference on Communications, May 19-23, 2008, Beijing, China. New York: IEEE, 2008: 4033-4037.
- [16] Kailath T, Sayed A H, Hassibi B. Linear estimation [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2000.