

引用本文:郭心悦,张慧,罗也.联合光源布局的协作可见光通信系统资源分配算法[J].光通信技术,2022,46(4):81-88.

联合光源布局的多小区协作可见光通信系统资源分配算法

郭心悦,张慧,罗也

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘要:针对室内可见光通信(VLC)系统中存在小区间干扰的问题,提出一种联合光源布局的多小区协作多输入多输出(MIMO)正交频分多址(OFDMA)VLC系统资源分配算法。首先,在不影响照明的前提下,通过优化光源布局,将小区干扰限制在2个LED覆盖范围内;然后,引入协作MIMO技术,以用户公平性为优化目标;最后,对基于空分复用(SMP)和重复编码(RC)这2种协作模式的MIMO OFDMA VLC系统资源分配性能进行仿真。仿真结果表明:2种协作模式的MIMO OFDMA VLC系统的性能均优于单输入单输出(SISO)OFDMA VLC系统。基于RC模式的VLC系统对信道相关性鲁棒,其传输速率约为SISO OFDMA VLC系统的1.2倍。当信道矩阵条件数低于6时,基于SMP模式的VLC系统因获得较大的复用增益性能更优;当信道矩阵条件数等于2时,其VLC系统数据传输速率约为SISO OFDMA VLC系统的1.32倍。

关键词:可见光通信;多小区协作;多输入多输出;正交频分多址;资源分配

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)04-0081-08

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Resource allocation algorithm for multi-cell cooperative visible light communication system with joint light source layout

GUO Xinyue, ZHANG Hui, LUO Ye

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problem of inter-cell interference in indoor visible light communication (VLC) systems, a resource allocation algorithm for multi-cell coordinated multiple-input multiple-output(MIMO) orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) VLC system with joint light source layout is proposed. First, without affecting the lighting, by optimizing the light source layout, the cell interference is limited to the coverage of two LEDs. Then, cooperative MIMO technology is introduced to take user fairness as the optimization goal. Finally, the resource allocation performance of MIMO OFDMA VLC system for two cooperative modes(SMP) and repetition coding(RC) is simulated. The simulation results show that the performance of the MIMO OFDMA VLC system of the two cooperative modes is better than that of the single-input single-output(SISO) OFDMA VLC system. The VLC system based on RC mode is robust to channel correlation, and its transmission rate is about 1.2 times that of the SISO OFDMA VLC system. When the channel matrix condition number is lower than six, the VLC system based on the SMP mode has better performance because of the larger multiplexing gain. When the channel matrix condition number is equal to two, the data transmission rate of the VLC system is approximately that of the SISO OFDMA VLC system 1.32 times.

Key words: visible light communication, multi-cell collaboration, multiple input multiple output, orthogonal frequency division multiple access, resource allocation

0 引言

近年来,随着智能设备的发展和广泛应用,人们

收稿日期:2022-04-22。

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:61501296)资助。

作者简介:郭心悦(1981—),女,江苏常熟人,博士,副教授,研究方向为无线通信技术。主持了国家自然科学基金、电磁波信息科学教育部重点实验室开放研究基金等课题,参与了国内第一本可见光通信专著《LED可见光通信技术》的编写工作,参与上海市科委重点项目,研究成果获得2013年中国国际工业博览会创新奖。



对高速移动网络服务的需求日益增长,导致现有的射频(RF)频谱资源越来越拥挤^[1]。与传统RF通信相比,可见光通信(VLC)具备频谱资源丰富、安全性高、成本低、无电磁干扰和无需授权等优势^[2-3],得到了国内外学术界和产业界研究人员的广泛关注。

为在室内VLC系统中实现均匀照明,通常需要部署多个发光二极管(LED)。但是,由于多个LED存在共照区域,且在多个LED的覆盖范围内可能涉及多个用户,因而会存在多小区干扰和多用户干扰的问题。

目前,预编码^[4-5]、非正交多址(NOMA)^[6-7]和正交频分多址(OFDMA)^[8-9]是 VLC 系统中研究较多的多址技术。相较于预编码和 NOMA,OFDMA 可在正交频分复用(OFDM)调制的同时,灵活实现多用户的正交接入,无需信道信息反馈,性能也不会随着用户数的增加而改变,因此受到了广泛关注。文献[10]提出一种 OFDMA VLC 系统的资源分配算法,该算法中共照区域的用户只选择一个 LED 为其提供服务,而相邻小区的 LED 为了避免干扰会闲置同频率对应的子载波,因此该算法的频谱利用率不高。文献[11]提出一种协作 VLC 系统,系统中一个小区部署了多个 LED,将小区分为单点传输区域和多点传输区域,以最大化系统速率为优化目标,研究了协作 VLC 系统子载波和功率的联合优化,因此该系统对光源布局要求较高。文献[12]提出引入多点协作技术,并设计了基于最小均方误差、最优准则的线性预编码器来实现多小区多用户的 VLC 系统,由于在发送端采用了预编码技术,故而需要反馈信道信息。针对上述文献存在的不足,本文提出一种联合光源布局的多小区协作多输入多输出(MIMO) OFDMA VLC 系统的资源分配算法。

1 系统模型

1.1 多小区多用户 VLC 系统

典型的室内多小区多用户 VLC 系统模型如图 1 所示。天花板上的多个 LED 不仅为整个房间提供照明,同时作为多个接入点为房间内的用户提供通信服务。本文将每个 LED 的覆盖范围定义为一个光小区。为保证室内的均匀照明,不同 LED 之间存在重叠的共照区域,因此不可避免地存在小区间干扰。图 1 中,用户 1 处于 LED2 的覆盖范围,用户 2 处于 LED4 的照射区域,用户 3 处于 LED2 和 LED4 的共照区域。

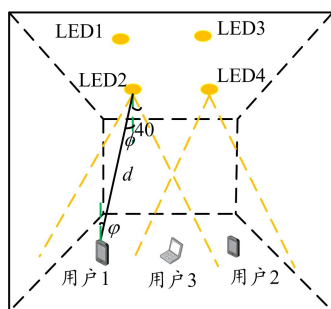


图 1 多小区多用户 VLC 系统模型

如果不对光源进行优化布局,则多个 LED 都可能存在共照区域,那么小区间的干扰就会变得很严重。因此,本文提出在不影响照明的前提下优化光源布局,使得光源能更好地发挥照明和通信的双重功能。具体优化思路为:光源布局应该综合考虑布局高度、视场角和 LED 辐射角。首先,考虑 LED 辐射角的大小和布局高度。当布局高度确定后,通过调整 LED 辐射

角的大小,将室内 VLC 系统中光小区的重叠区域限制在 2 个光源范围内。其次,考虑光源视场角对布局的影响。当小视场角时,接收平面的光功率主要分布在 LED 正下方,会出现通信盲区,适当增大接收视场角可以在一定程度上避免出现通信盲区。最后,在完成光源布局后,就能避免 2 个以上光源的共照,将小区干扰限制在 2 个 LED 覆盖范围内。

1.2 白光 LED 光学特性

光源布局需要考虑光照度的影响,它衡量了接收平面的明暗程度。假定 LED 符合朗伯辐射模型,接收平面上某点的光照度^[13]可以表示为

$$E_{\text{hor}} = I(0) \cos^l(\phi) / d^2 \cos(\varphi) \quad (1)$$

其中, $I(0)$ 为 LED 中心发光强度; ϕ 表示发射角; φ 表示入射角; d 为 LED 与接收端之间的距离; l 为朗伯辐射系数, $l = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})}$, $\Phi_{1/2}$ 为半功率角。

1.3 信道模型

为实现多小区协作 MIMO 传输,本文假设每个用户端配置 2 个光电探测器(PD)构成 MIMO 传输结构。

VLC 系统中,通过 OFDM 调制可将信道分成若干个平坦的子信道,且不受频率选择性衰落的影响。用户 1 中,LED2 和用户端的 2 个 PD 构成 1 个 1×2 的单输入多输出(SIMO)系统,其频域第 k 个子信道的模型为

$$\begin{bmatrix} Y_1^{(k)} \\ Y_2^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}^{(k)} \\ H_{21}^{(k)} \end{bmatrix} X^{(k)} + \begin{bmatrix} N_1^{(k)} \\ N_2^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $Y_1^{(k)}$ 为用户 1 的 PD1 接收到的信号; $Y_2^{(k)}$ 为用户 1 的 PD2 接收到的信号; $X^{(k)}$ 为 LED2 发送的数据; $N_1^{(k)}$ 和 $N_2^{(k)}$ 分别为 PD1 和 PD2 接收的噪声; $H_{ij}^{(k)}$ 表示第 k 个子信道上第 i 个 PD 与第 j 个 LED 之间视距链路的信道增益。

因用户 3 处于 2 个 LED 的共照区域,此时 2 个 LED 与用户端的 2 个 PD 构成 1 个 2×2 MIMO 系统。因此,用户 3 对应的频域第 k 个子信道模型为

$$\begin{bmatrix} Y_1^{(k)} \\ Y_2^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}^{(k)} & H_{12}^{(k)} \\ H_{21}^{(k)} & H_{22}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1^{(k)} \\ X_2^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1^{(k)} \\ N_2^{(k)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $X_1^{(k)}$ 和 $X_2^{(k)}$ 分为 LED2 和 LED4 发送的数据。

在式(2)和式(3)中,信道增益值由 LED 的频率响应和光无线信道的增益共同决定,即本文考虑的信道模型是 LED 频率响应和无线光信道共同组成的等效信道。

使用一个带蓝色滤波片的白光 LED,蓝色滤波片将响应较慢的黄色光成分滤除后,LED 的频率响应函数^[14]为

$$G(f)=\exp\left(-\frac{f}{f_b}\right) \quad (4)$$

其中, f 为频率, f_b 为匹配系数。

当 LED 与 PD 之间的信道增益大小数量级为 10^{-4} 时,信号经过视距(LOS)路径到达接收端的路径损耗为 -80 dB;信号经过墙壁一次反射后,接收端接收到的一次反射路径的损耗约为 110~120 dB,远高于 LOS 路径,且高阶反射的路径损耗更大^[20]。因此,本文只考虑 LOS 链路和符合朗伯辐射特性的 LED 模型,信道模型如图 2 所示,第 i 个 PD 与第 j 个 LED 之间的 LOS 光无线信道的信道增益 w_{ij}^{LOS} ^[13]表示为

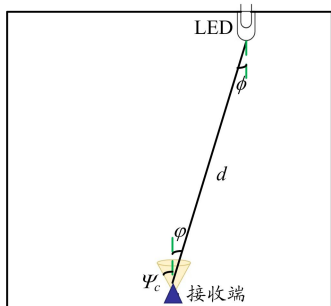


图 2 室内 VLC 信道模型

$$w_{ij}^{\text{LOS}} = \frac{(I+1)A}{2\pi d^2} \cos^l(\phi_{ij}) \cos(\phi_j) T_s(\varphi) g(\varphi), 0 \leq \varphi \leq \Psi_c \quad (5)$$

其中, A 为接收端的检测面积, φ_{ij} 为 LED 与 PD 之间的入射角, ϕ_j 为 LED 与 PD 之间的发射角, $T_s(\varphi)$ 为滤光片增益, $g(\varphi)$ 为聚光器光学增益, Ψ_c 为接收端的视场角。 $g(\varphi)$ 定义为

$$g(\varphi) = \begin{cases} \frac{z^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \varphi \leq \Psi_c \\ 0, & 0 \geq \Psi_c \end{cases} \quad (6)$$

其中, z 为折射率。

2 基于协作 MIMO OFDMA VLC 系统的资源分配算法

针对现有研究的不足,本文引入协作 MIMO 技术将小区多个 LED 的干扰问题转变为利用多个 LED 相互协作共同为共照用户服务的问题。这样,系统中所有的频谱资源都能得到充分利用,传输速率也会得到有效的提高。

在 VLC 系统中,由于 LED 和 PD 的间距、相对位置及入射角都会影响 MIMO 信道的相关性^[15],且在不同的信道相关性条件下,不同的 MIMO 技术性能差别很大。因此,本文对重复编码(RC)和空分复用(SMP)这 2 种 MIMO 主流协作模式在高相关性和低相关性

信道中的应用进行研究。RC,即 MIMO 的多个发射端同时发送相同信息的数据,在接收端合并接收获得分集增益,其性能不受信道相关性的影响,但无法获得复用增益;SMP 能同时传输多路独立的数据流,使系统获得较大的复用增益,但其性能随着 MIMO 信道相关性的增大而急剧下降。

本文在协作 MIMO VLC 系统框架下,提出一种以用户的公平性为优化目标的子载波和调制阶数的 OFDMA 资源分配算法。分配中,将小区分为 2 种类型,并根据不同的小区类型实施不同的子载波分配策略:

类型 I:当小区只剩一个用户未分配资源,此时该用户可使用所有剩余的子载波资源。

类型 II:当小区未分配资源的用户数大于或等于 2 时,根据最小速率最大化公平性准则,对这些用户进行资源分配。

基于最小速率最大化公平性准则的多用户资源分配的最优化问题 Q ^[16]可描述如下:

$$Q = \max_{\lambda} \min_n \sum_{k=1}^K b_{n,k}, n=1, \dots, N \quad (7)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K p_{m,n,k} = P_t, m=1, \dots, M \\ \sum_{n=1}^N K_n = K \\ 1 \leq \sum_{k=1}^K \lambda_{n,k} \leq K, n=1, \dots, N \\ BER_0 \leq 3.8 \times 10^{-3} \end{cases} \quad (8)$$

其中, M 为 LED 数量, N 为该小区对应的用户数, $b_{n,k}$ 为第 n 个用户第 k 个子载波携带的比特数, $p_{m,n,k}$ 为第 m 个 LED 分配给第 n 个用户的 k 个子载波的功率。由于本文未考虑功率的分配,所以将 $p_{m,n,k}$ 都设为 1。 P_t 为每个 LED 的总功率, K_n 为小区内第 n 个用户分到的子载波数, K 为子载波总数, $\lambda_{n,k}$ 为二值变量(取值为 0 或 1,当取值为 1 时 $\lambda_{n,k}$ 表示第 k 个子载波分配给第 n 个用户), BER_0 表示每个子载波的目标误码率门限。

由于在系统中采用正交幅度调制(QAM),根据文献[17],第 k 个子载波可携带的比特数由该子载波的信噪比和目标误码率决定,即

$$b_{n,k} = \left\lfloor \log_2 \left(1 - \frac{1.5 SNR_n(k)}{\log(5 BER_0)} \right) \right\rfloor \quad (9)$$

其中, $SNR_n(k)$ 表示第 n 个用户的第 k 个子载波的信噪比, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

根据不同的传输模式,信噪比的计算方式也不同。本文将信噪比计算分为3种:

①当用户位于1个LED的覆盖区域时,此时发射LED和用户间构成SIMO VLC系统,则用户 n 第 k 个子载波的接收信噪比为

$$SNR_{m,n}(k) = \frac{|H_{1m}(k) + H_{2m}(k)|^2}{\sigma^2(k)}, m \in M \quad (10)$$

其中, $H_{1m}(k)$ 和 $H_{2m}(k)$ 表示用户2个PD与第 m 个LED之间的信道增益, $\sigma^2(k)$ 表示第 k 个子信道的噪声方差。

②当用户位于2个LED的共照区域时,RC模式下用户 n 第 k 个子载波的接收信噪比^[18]为

$$SNR_n^{RC}(k) = \frac{\sum_{i=1}^2 \left| \sum_{m=1}^M H_{i,n,m}(k) \right|^2}{\sigma^2(k)}, k=1, \dots, K \quad (11)$$

其中, i 表示用户PD的个数。

③当用户位于2个LED的共照区域时,SMP模式下用户 n 第 k 个子载波的接收信噪比^[19]为

$$SNR_n^{SMP}(k) = \frac{1}{\sigma^2(k) [(\mathbf{H}(k)^H \mathbf{H}(k))^{-1}]_{i,i}}, k=1, \dots, K \quad (12)$$

其中, $[\cdot]_{i,i}$ 表示矩阵第 i 行第 i 列的元素, $(\cdot)^H$ 和 $(\cdot)^{-1}$ 分别表示对目标矩阵进行共轭转置和求逆运算, $\mathbf{H}(k)$ 表示用户 n 第 k 个子载波所对应的信道矩阵。

综上所述,每个用户根据自身传输模式从式(10)~式(12)中选择信噪比计算方式,然后由式(9)得到每个用户 K 个子载波的比特数,最后求解由式(7)~式(8)给出的最优化方程。具体的求解算法步骤如表1所示。

表1 子载波分配算法步骤

输入: 每个用户的信道矩阵, 每个用户 K 个子载波比特数 $\{b_{nk}\}_{k=1}^K$, $n=1, \dots, N$
1: for m to M do
2: if 小区为类型I then
3: 未分配子载波的用户使用小区内剩余子载波资源
4: else
5: 小区为类型II, 从每个未分配子载波用户的 $\{b_{n,k}\}_{k=1}^K$ 中选取一个子载波, 并将携带的比特数作为用户的初始速率
6: $K \leftarrow K - \{n\}$
7: while $K > 0$ do
8: 为速率最低的用户分配子载波
9: 整理每个用户的子载波
10: $K \leftarrow K - 1$
11: end while
12: end if
13: end for
输出: 每个用户的比特速率 $b_n, n=1, \dots, N$

3 仿真与结果分析

本文采用Matlab软件进行仿真,验证所提算法的优越性。室内VLC通信场景的平面投影图如图3所示,房间内共有4个LED灯,即4个小区,在区域内共分布了6个用户。每个小区的覆盖范围即图形范围,图中黑色的正方形即房间的范围。

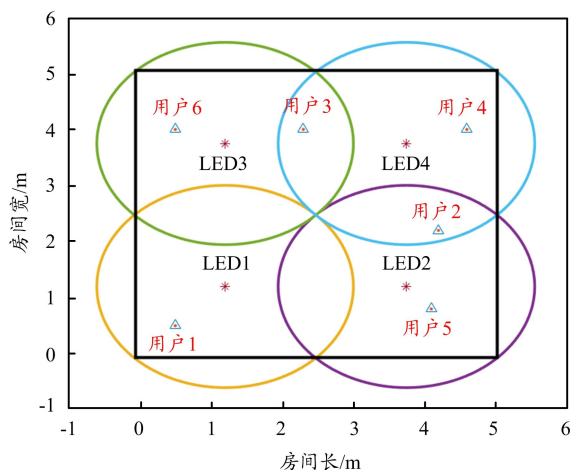


图3 室内4个小区示意图

3.1 光照度与信道仿真

本文的光源布局思想是将共照区域限制在2个LED覆盖范围内。仿真中涉及的系统参数设置如表2所示,大多数参数仿照文献[20]设置,如LED间距,用户PD的视场半角、PD的接收面积和LED半功率角等;白光LED光学特性参数按照文献[13]进行设置。本文考虑的信道模型为LED频率响应和无线光信道共同组成的等效信道。LED的频响特性可以表示为一阶指数函数。由于在VLC系统中只能传输实信号,故OFDM调制时实际可用的子载波数为127个,实际可用带宽为10 MHz。

基于本文光源布局思想的室内光照度分布图如图4所示。根据国际标准化组织对一般办公场所的光照度要求,光照度应该介于300~1500 lx之间。由图4可以看出,整个房间的光照度基本在300 lx以上。在中心区域,由于LED光照度的叠加,处于共照区域的光照度呈现出较高的数值;在房间靠近墙面的地方,大部分区域光照度也能满足大于300 lx的要求。接收功率分布图如图5所示。可以看出,整个房间不存在阴影区域,接收功率的范围为-1.8~4.3 dBm。

本文将6个用户的分布情况分为两类:处于LED的共照区域和非共照区域的用户。图3中,用户2和用户3分别处于2个LED的共照区域,故构成2个MIMO信道。在仿真中,本文固定了LED和PD的位

表 2 仿真参数

参数	取值
LED 半功率角 $\Phi_{1/2}/(^{\circ})$	40
PD 接收面积 A/cm^2	1
PD 视场角 $\Psi_t(^{\circ})$	70
单个 LED 灯功率/mW	$20^{[14]}$
LED 灯数/个	60×60
光滤波器增益 $T_s(\varphi)$	1
透镜折射率	1.5
LED 中心发光功率/cd	0.73
匹配系数 f_b/Hz	8.5×10^6
房间长/m、宽/m、高/m	5、5、3
PD 间距/cm	5
接收平面高度/m	0.85
LED 数量和用户数量/个	4、6
子载波数 N /个	$256^{[21]}$
调制带宽/MHz	20
天花板到接收平面的垂直高度 L/m	2.15
LED 位置	(1.2,1.2,3); (3.75,1.2,3); (1.2,3.75,3); (3.75,3.75,3)
用户位置	(0.5,0.5,0.85); (4.2,2.2,0.85); (2.3,4,0.85); (4.6,0.8,0.85); (0.5,4,0.85)

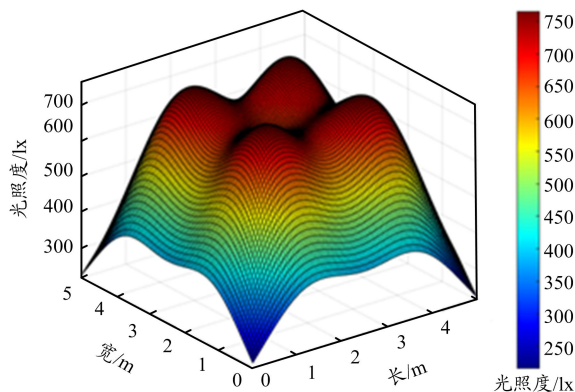


图 4 光照度分布

置,通过改变 LED 与用户 2 个 PD 之间的入射角可以降低信道相关性。第 j 个 LED 与第 i 个 PD 之间的入射角的余弦值为

$$\cos(\varphi_{ij}) = \frac{L}{d_{ij}} \quad (13)$$

其中, L 为 LED 平面到用户平面的距离, d_{ij} 为第 i 个 PD 与第 j 个 LED 之间的距离。再根据反余弦函数就

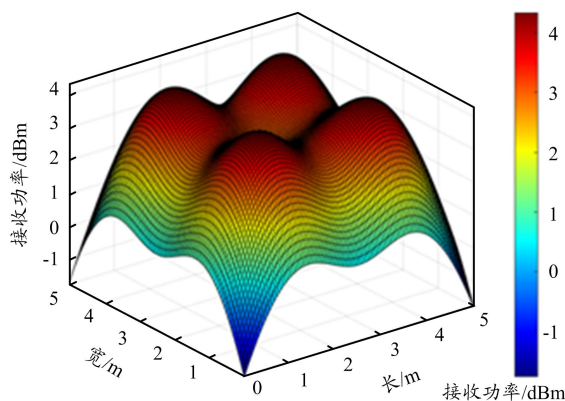


图 5 接收功率分布

可以得到相应的入射角大小。

以用户 2 为例,当 LED 的方向为垂直向下,PD 的方向是垂直向上时,用户 2 的 2 个 PD 与 LED2 和 LED4 之间的入射角分别为

$$\begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 27.02^{\circ} & 36.89^{\circ} \\ 27.98^{\circ} & 35.06^{\circ} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, φ_{11} 和 φ_{12} 别为 PD1 与 LED2 和 LED4 之间的入射角度, φ_{21} 和 φ_{22} 分别为 PD2 与 LED2 和 LED4 之间的入射角度。

当 LED 的方向为垂直向下,通过将 2 个 PD 分别朝着不同的 LED 偏转,改变入射角角度,此时 2 个 PD 与 LED2 和 LED4 之间的入射角度可以表示为

$$\begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 27.02^{\circ} - \theta & 36.89^{\circ} + \theta \\ 27.98^{\circ} + \theta & 35.06^{\circ} - \theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, θ 为 PD 偏转的角度。由式(15)得到用户 2 的 2 个 PD 不同的入射角,再结合式(5)可以计算出用户 2 不同相关性的无线光信道的信道矩阵。

用户 2 的 PD1 与 LED2 之间的入射角 φ_{11} 与信道矩阵条件数的关系如图 6 所示。信道矩阵条件数越大,表明信道相关性也越高。可以看出,随着入射角 φ_{11} 的减小,信道相关性也随之降低。用户 2 的入射角 φ_{11} 为 2° 和 22° 且每个子信道的信道矩阵条件数为 2 和 14 时的等效信道频率响应曲线分别如图 7 和图 8 所示。其中, H_{ij} 表示第 j 个 LED 与第 i 个 PD 间的信道频率响应的幅度。可以看出,当信道矩阵条件数为 2 时,不同信道链路的差异较大;当信道矩阵条件数为 14 时,各信道链路较为相似,接收端很难分离多个独立的数据流,导致 SMP 的系统性能下降。

3.2 系统性能仿真

本文将基于 2 种协作模式的 MIMO OFDMA VLC 系统与现有的以用户公平性为优化目标的 SISO OFDMA VLC 系统性能进行比较^[10]。

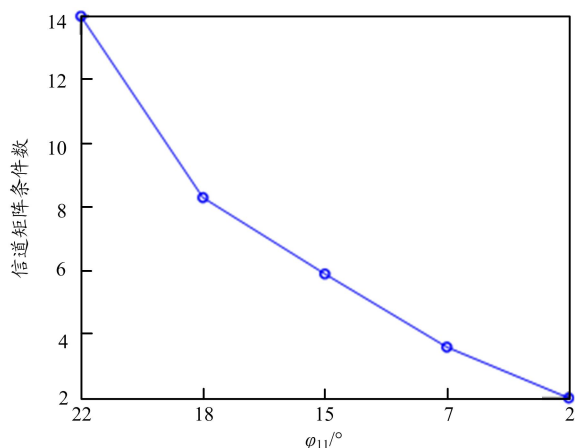


图6 φ_{11} 与信道矩阵条件数的关系

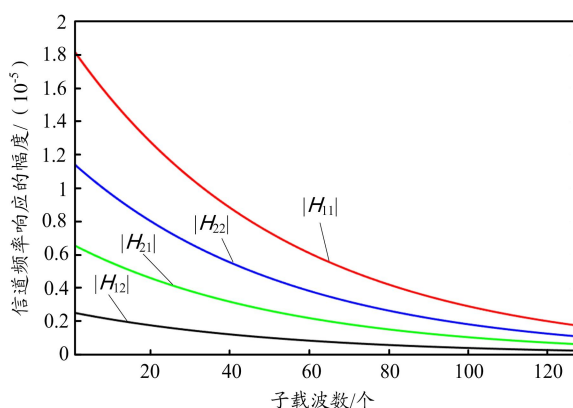


图7 当 φ_{11} 为 2° 且

每个子信道矩阵条件数为 2 时的等效信道频率响应

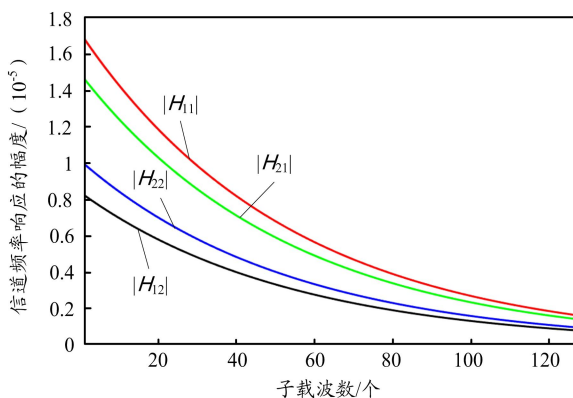
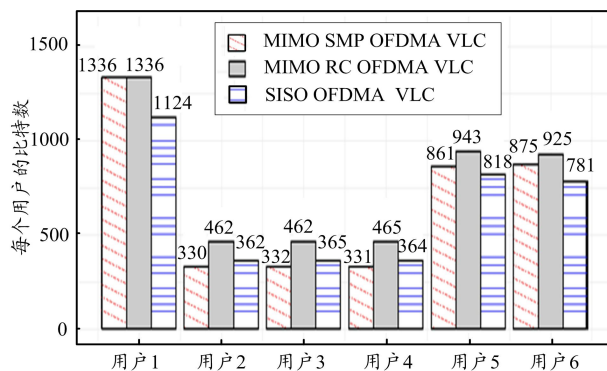


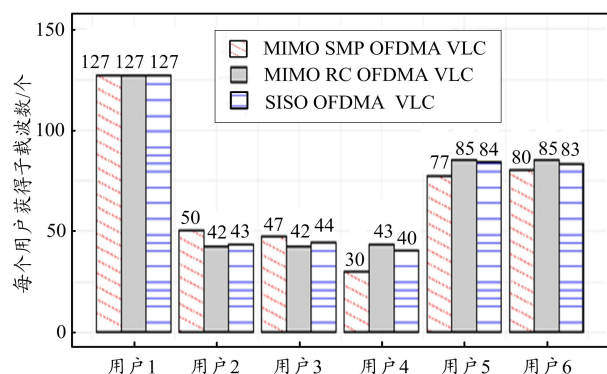
图8 当 φ_{11} 为 22° 且

每个子信道矩阵条件数为 14 时的等效信道频率响应

当信道矩阵条件数为 2 时,3 种方案的系统用户子载波数和比特数的分配结果如图 9 所示。可以看出,基于 SMP 和 RC 这 2 种协作模式的 MIMO OFDMA VLC 系统的性能都优于 SISO OFDMA VLC 系统。对于处于共照区域的用户(用户 2 和用户 3),在 SMP 模式下,用户因获得复用增益而能传输更多的比特数;在



(a) 不同方案中每个用户实际获得比特数



(b) 不同方案中每个用户实际获得子载波数

图9 当信道矩阵条件数为 2 时, 3 种方案中每个用户实际获得比特数和子载波数

RC 模式下,用户能同时获得发射端和接收端的分集增益,因此,系统性能也有大幅度提升。对于处于非共照区域的用户(用户 1、用户 4、用户 5 和用户 6),因接收端同样配置了 2 个 PD,因此能获得接收端的分集增益,分配的比特数也有一定程度的提升。由图 9 可知,SMP 模式下的所有用户分配的总比特数更多,这是因为在信道相关性较低时,SMP 能获得较大的复用增益,其性能优于 RC 模式。此外,用户 2、用户 3 和用户 4 因同属于 LED4 对应的小区,相互竞争资源,根据最小速率用户最大化准则进行子载波分配,基本能保证每个用户分配资源的公平性;用户 5 虽然和用户 2 处于同一小区,但用户 2 因处于共照区域,已确定其可用的频谱资源,因此,用户 5 可使用除用户 2 占用频谱外 LED2 所有的频谱资源;用户 6 亦是如此;而用户 1 所在的小区只有一个用户,因此用户 1 可以使用 LED1 的所有频谱资源。

当信道矩阵条件数为 14 时,3 种方案不同用户子载波数和比特数的分配结果如图 10 所示。当信道相关性较高时,SMP 模式的系统复用增益会减小。SMP 模式下用户分配的比特数相比图 9 有较大幅度下降,而

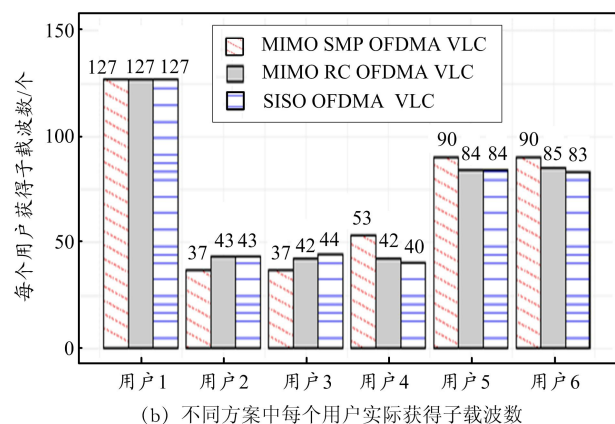
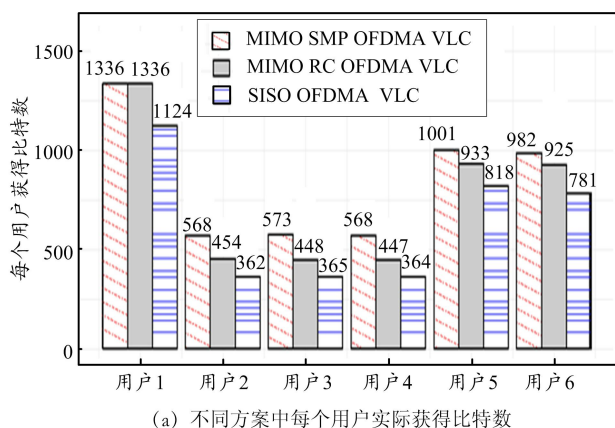


图 10 当信道矩阵条件数为 14 时,
3 个方案中每个用户实际获得比特数和子载波数

RC 模式下系统的性能相比图 9 则变化不大,证明了 RC 对信道相关性鲁棒。

不同信道相关性条件下,2 种协作模式的 MIMO OFDMA VLC 系统与 SISO OFDMA VLC 系统的传输速率情况如图 11 所示。纵坐标的值表示不同系统与 SISO OFDMA VLC 系统传输速率的比值,即性能增益,该传输速率反映了引入协作 MIMO 技术后的性能增益。可以看出,随着信道矩阵条件数的增加,2 种协作模式下 MIMO OFDMA VLC 系统的传输速率呈现出不同的变化趋势。这是因为对于 SMP 模式而言,信道矩阵条件数的增加会降低其复用增益;RC 模式的性能则会随着信道相关性的增高变化不大。当信道矩阵条件数小于 6 时,基于 SMP 模式的系统性能更优;当信道矩阵条件数大于 6 时,选择 RC 模式可以获得更高的传输速率;当信道矩阵条件数为 2 时,基于 SMP 模式的系统传输速率约为 SISO OFDMA VLC 系统的 1.32 倍;当信道条件数增大至 14 时,其传输速率相比 SISO OFDMA VLC 系统降低 1.06 倍,而基于 RC 模式系统的传输速率始终能保持为 SISO OFDMA VLC 系统的 1.2 倍。因此,为了保证系统始终能工作在最优状

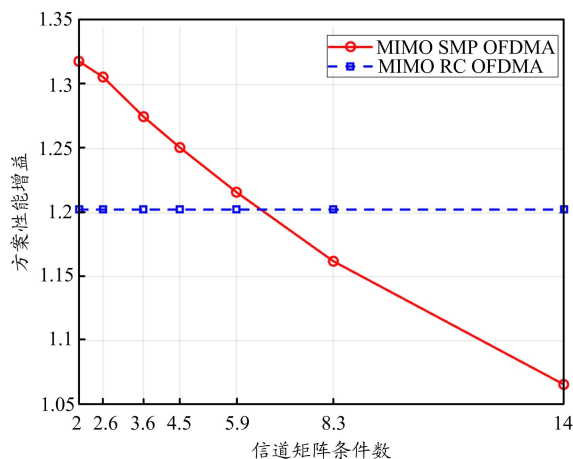


图 11 与 SISO OFDMA VLC 相比,2 种协作模式的
MIMO OFDMA VLC 在不同信道矩阵条件数下的性能增益

态,可根据接收端信道相关性的值来选择 MIMO 的协作模式,即进行 MIMO 切换。图 11 中,2 条曲线的交点对应的信道相关性值即是通过理论仿真得到的最优切换阈值。

4 结束语

本文提出了一种联合光源布局的多小区协作 MIMO VLC 系统资源分配算法。首先,在不影响照明的前提下,通过优化光源布局,将小区干扰限制在 2 个 LED 覆盖范围内;然后,引入多小区协作 MIMO 技术,以用户公平性为优化目标,提出基于协作 MIMO 技术的多用户 OFDMA VLC 系统子载波和调制阶数的资源分配算法。考虑到 VLC 系统中信道相关性对不同 MIMO 技术性能有很大的影响,本文同时考虑了 SMP 和 RC 这 2 种主流的 MIMO 模式。仿真结果表明:基于 2 种协作模式下的 MIMO OFDMA VLC 系统的性能均优于 SISO OFDMA VLC 系统。基于 RC 模式系统的性能随信道相关性变化基本保持不变,传输速率约为 SISO OFDMA VLC 系统的 1.2 倍。而基于 SMP 模式的系统性能在信道矩阵条件数小于 6 时,因获得较大的复用增益而性能更佳。当信道矩阵条件数为 2 时,其传输速率约为 SISO OFDMA VLC 系统速率的 1.32 倍。

参考文献:

- [1] KHADR M H, ELGALA H. Augmented communications: spectral efficiency and security enhanced visible light communications by design[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(9): 090601-1-090601-6.
- [2] MAPUNDA G A, RAMOGOMANA R, MARATA L, et al. Indoor visible light communication: a tutorial and survey [EB/OL].[2022-04-22]. <https://www.xueshufan.com/publication/3112162098>.

- [3] AL-KHAFFAFD A J, ALSAHLANYA M. A cloud VLC access point design for 5G and beyond [J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(8): 1–10.
- [4] HONG Y, CHEN J, WANG Z, et al. Performance of a precoding MIMO system for decentralized multiuser indoor visible light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(4): 7800211–7800211.
- [5] YANG H, CHEN C, ZHONG W D, et al. Joint precoder and equalizer design for multi-user multi-cell MIMO VLC systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 11354–11364.
- [6] UDAY T, KUMAR A, NATARAJAN S M A L. Joint NOMA for improved SER of cell-edge users in multi-cell indoor VLC [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(1): 13–17.
- [7] CHEN Z, HUANG Z, JI Y. Matching theory-based user-grouping for indoor non-orthogonal multiple access visible light communication heterogeneous networks[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(6): 060602-1–060602-5.
- [8] 宋小庆,王慕煜,邢松,等. 可见光通信 OFDM 系统 PAPR 抑制技术研究进展[J]. 光通信技术,2019,43(12):1–6.
- [9] LIAN J, BRANDT-PEARCE M. Multiuser visible light communication systems using OFDMA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(21): 6015–6023.
- [10] BYKHOVSKY D, ARNON S. Multiple access resource allocation in visible light communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8): 1594–1600.
- [11] 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.
- [12] MA H, LAMPE L, HRANILOVIC S. Coordinated broadcasting for multiuser indoor visible light communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3313–3324.
- [13] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100–107.
- [14] CHI N. LED-based visible light communications[M]. Berlin: Springer, 2018.
- [15] 刘建开,岳殿武,赵正铎. 基于角度分集接收机的多小区多用户 MIMO-VLC 系统[J]. 光通信技术,2019,43(11):37–42.
- [16] 李城鑫,黄玉清,李强. 改进的多用户 OFDM 系统子载波和比特分配算法[J]. 信息与电子工程,2010,8(6):660–664.
- [17] GUO X, LI X. Experimental demonstration of an adaptive orthogonal frequency division multiplexing visible light communication system [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(11): 110604-1–110604-5.
- [18] NARMANLIOGLU O, KIZILIRMAK R C, BAYKAS T, et al. Link adaptation for MIMO OFDM visible light communication systems[J]. IEEE Access, 2017(5): 26006–26014.
- [19] 郭心悦,李鑫. 基于 MIMO-OFDM 调制的室内 VLC 自适应传输方案研究[J]. 光学技术,2018,44(11):35–40.
- [20] CHEN C, YANG Y, DENG X, et al. Space division multiple access with distributed user grouping for multi-user MIMO-VLC systems[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020(1): 943–956.
- [21] GUO X, YUAN Y, PAN C, et al. Interleaved superposed-64QAM-constellation design for spatial multiplexing visible light communication systems[J]. Optics Express, 2021, 29(15): 23341–23356.