

引用本文: 潘超, 郭心悦. 基于 OFDMA 的多小区协作可见光通信系统二维功率分配算法[J]. 光通信技术, 2023, 47(5): 6-11.

# 基于 OFDMA 的多小区协作可见光通信系统二维功率分配算法

潘超, 郭心悦\*

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了消除可见光通信系统中多小区和多用户信号干扰, 提出一种基于正交频分多址(OFDMA)的多小区协作可见光通信系统二维功率分配算法。首先, 根据信道情况, 采用 OFDMA 多小区协作资源分配算法给信道情况差的用户分配更高的功率; 然后, 根据信道信息求解共照区域用户多个协作发光二极管(LED)的发送功率比, 得到最优的目标叠加星座。仿真结果表明: 与平均功率分配算法相比, 一维功率分配算法误码率性能平均提升了 16%; 与一维功率分配算法相比, 二维功率分配算法误码率性能平均提升了 10%。

**关键词:** 可见光通信; 协作资源分配; 功率分配; 多小区; 多用户; 正交频分多址

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)05-0006-06

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Two-dimensional power allocation algorithm for multi-cell coordinated visible light communication system based on OFDMA

PAN Chao, GUO Xinyue\*

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

**Abstract:** In order to eliminate interference from multi-cell and multi-user signals in visible light communication systems, a two-dimensional power allocation algorithm based on orthogonal frequency division multiple access(OFDMA) for multi-cell collaborative visible light communication systems is proposed. Firstly, based on the channel situation, an OFDMA multi-cell collaborative resource allocation algorithm is adopted to allocate higher power to users with poor channel conditions. Then, based on the channel information, the transmission power ratio of multiple cooperative light emitting diode (LED) in the shared illumination area is calculated to obtain the optimal target superposition constellation. The simulation results show that compared with the average power allocation algorithm, the bit-error rate of one-dimensional power allocation algorithm is improved by 16% on average. Compared with the one-dimensional power allocation algorithm, the bit-error rate of the two-dimensional power allocation algorithm is improved by 10% on average.

**Key words:** visible light communication, coordinated resource allocation, power allocation, multi-cell, multi-user, orthogonal frequency division multiple access

## 0 引言

可见光通信(VLC)因具有更快的理论通信速率、更强的通信安全性、更加绿色环保等优点, 正受到越来越多的关注<sup>[1-7]</sup>。在 VLC 的常见场景中, 每个发光二极

管(LED)的覆盖范围内都有可能存在多个用户, 且这些用户的分布是随机的, 这就导致了多用户干扰的出现。同时, 由于 LED 的带宽限制, 基于正交频分复用(OFDM)的正交频分多址(OFDMA)被广泛应用于 VLC 系统中, 它不仅结构简单, 还可以灵活地实现功率和带宽资源的分配<sup>[8-9]</sup>。CHEN C 等人<sup>[10]</sup>提出了一种 VLC 混合非正交多址接入(NOMA)/OFDMA 功率分配算法, 该算法首先对每个用户进行两两分组, 然后在同组内的用户之间以及不同组别之间, 为信道状况较差的用户和组分配更高的功率, 最终降低了系统的平均误码率。该算法只考虑了单小区的多用户分布情况, 未考虑到多小区的资源分配问题, 当不同组别用户同时处于多小区共照区域时, 会造成小区之间的信

收稿日期: 2023-03-01。

基金项目: 国家重点研发计划(批准号: 2018YFB1801503)资助。

作者简介: 潘超(1998—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生。本科毕业于常州工学院电子信息工程专业, 现就读于上海理工大学光电信息与计算机工程学院信息与通信工程专业, 主要研究方向为可见光通信信号处理技术。

\*通信作者: 郭心悦(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线通信技术。



号干扰。LIAN J 等人<sup>[11]</sup>提出了一种针对 VLC 多小区 OFDMA 的子载波及功率分配算法。该算法允许不同小区的用户复用子载波, 并通过最大化每个用户的最小吞吐量来优化其调制指数, 从而提高了系统吞吐量。然而, 该算法假定每个用户仅由一个 LED 服务, 未考虑到共照区域用户的资源分配问题。当多个 LED 同时为同一用户服务时, 会引发载波间干扰(ICI), 共照区域的用戶間也存在小區間信號干擾<sup>[12]</sup>。

协作多点技术通过多个 LED 协作, 将多个 LED 接入点(AP)的干扰问题转变成多个 LED 共同为用户服务的问题, 可以提升系统性能<sup>[13]</sup>。多输入多输出(MIMO)技术作为协作多点技术中的一种, 具有消除干扰、实现复用增益的优点, 在协作资源分配中受到越来越多的关注<sup>[15]</sup>。基于此, 本文针对多小区多用户 VLC 系统, 提出一种基于 OFDMA 的多小区协作 VLC 系统二维功率分配算法, 有效提升系统的误码率性能。

## 1 系统模型

### 1.1 基于 OFDMA 的多小区协作资源分配算法

图 1 为一个典型的室内 VLC 场景图。LED 的投影区域共分为 4 种类型, 分别用  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$  表示, 其中下标表示在相应区域中可以接收信号的 LED 数量。场景中有 4 个 AP ( $AP_1 \sim AP_4$ ), 随机分布 6 个用户 ( $U_1 \sim U_6$ ), 其中  $U_1 \sim U_3$  位于  $L_1$  中,  $U_4, U_5$  位于  $L_2$  中,  $U_6$  位于  $L_3$  中。本文提出的基于 OFDMA 的多小区协作资源分配算法如下: 对于非共照区域的用户  $U_1 \sim U_3$ , 由于每个用户只被一个 AP 服务, 不会受到来自其它 AP 的信号干扰, 所以其频段可以进行重用; 对于共照区域

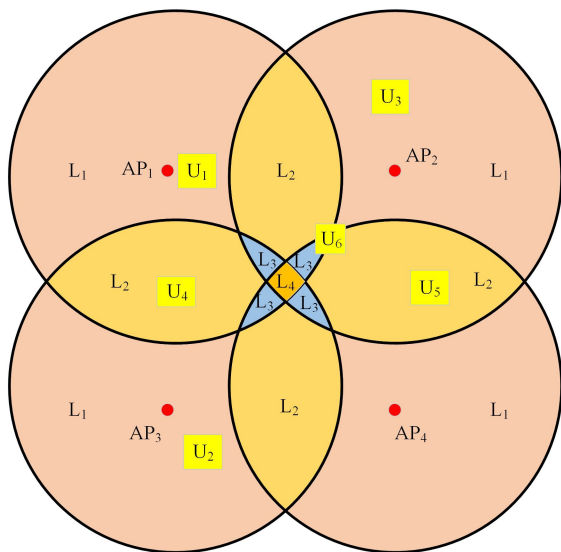


图 1 室内 VLC 场景图

的用户  $U_4 \sim U_6$ , 会被多个 AP 服务 ( $AP_1$  服务  $U_1, U_4, U_6$ ,  $AP_2$  服务  $U_3, U_5, U_6$ ,  $AP_3$  服务  $U_2, U_4$ ,  $AP_4$  服务  $U_5, U_6$ ), 为了避免用户间信号干扰, 不同用户之间的频段不能进行重用, 当共照区域用户被多个 AP 服务时, 采用 MIMO 技术实现复用增益, 进一步提高系统性能; 对于同一个小区的不同用户, 可以直接对频段进行复用。

### 1.2 多小区信道模型

图 2 是 2 个 LED 与 4 个用户组成的 OFDMA 系统简化多小区信道模型图, 其中每个 LED 都作为 AP, 为处于其光覆盖范围内的用户提供服务, 形成了一个多小区的 VLC 系统<sup>[17]</sup>。对于非共照区域的  $U_1, U_4$ , 其频段可以进行复用, 对于共照区域的  $U_2, U_3$ , 其频段不能进行复用, 否则会发生信号干扰。不同用户之间的信道情况各不相同。

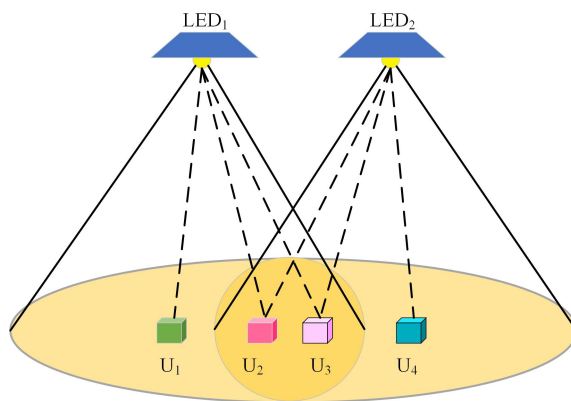


图 2 多小区信道模型图

可见光的传播分为视距传播(LOS)和非视距传播(NLOS)<sup>[18]</sup>。当存在 NLOS 时, 其反射链的最强信号至少比 LOS 链路信号的信噪比低 7 dB, 因此本文只考虑 LOS。一般 LED 都符合朗伯辐射模型, 其 LOS 的信道增益<sup>[19]</sup>可表示为

$$H = \begin{cases} \frac{s_{PD}(l+1)}{2\pi d^2} \cos^l \phi \cos \phi, & 0 < \phi < \Phi \\ 0, & \phi > \Phi \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $s_{PD}$  是接收端光电二极管(PD)的有效接收面积,  $d$  是发送端 LED 与接收端 PD 之间的距离,  $\phi$  是 LED 的发射角度;  $l$  是朗伯辐射系数,  $l = -1/(\log_2 \cos \psi_{1/2})$ , 其中  $\psi_{1/2}$  是 LED 的半功率角度;  $\Phi$  是 PD 的视场角度,  $\phi$  是 PD 的入射角度, 当 PD 的入射角度大于其视场角度时, 信道增益为 0。在以上与信道有关的数据中,  $d, \phi, \Phi$  这 3 个数据是未知的, 这主要与用户的随机分布位置有关。

在经过  $M$  阶正交振幅调制(QAM)与功率分配之

潘超,郭心悦: 基于 OFDMA 的多小区协作可见光通信系统二维功率分配算法

后,发送端的信号可以表示为

$$X = \sum_{i=1}^q \sum_{k=1}^K P_{i,k} S_{i,k} \quad (2)$$

其中,  $S_{i,k}$ 、 $P_{i,k}$  分别表示从第  $i$  个 LED 发送的第  $k$  个用户的调制信号和对应分配给用户的功率,  $q$  表示服务第  $k$  个用户的 LED 个数,  $K$  表示当前通信场景中的用户总个数(本文  $K=6$ )。

在接收端, 每个用户都会收到来自一个或者多个 LED 的信号, 经过解调后, 信号可以表示为

$$Y_k = \sum_{i=1}^q \sum_{k=1}^K R_{i,k} P_{i,k} S_{i,k} + N_k \quad (3)$$

其中,  $R_{i,k}$  表示服务第  $k$  个用户的第  $i$  个 LED 与该用户之间的频率响应,  $N_k$  表示均值为 0、方差为  $\sigma_k^2$  的高斯白噪声。不同用户的  $q$  是不同的, 对于非共照区域,  $n$  为 1, 对于共照区域,  $n$  为 2 或 3。

## 2 二维功率分配算法

针对如何进行不同用户之间的功率分配问题, 本文提出了一种基于信道信息的功率分配算法, 该算法通过在一维功率分配中实现各用户间的功率分配, 然后对共照区域用户进行进一步处理, 实现多路信号之间的二维功率分配。

### 2.1 用户之间的一维功率分配

一维功率分配算法过程如下: 首先, 根据用户信道情况进行排序; 然后, 在总功率不变的情况下为信道情况更差的用户分配更高的功率。

将每个用户的信道条件从好到差排序为

$$C_{U_1} \geq C_{U_2} \geq \dots > C_{U_K} \quad (4)$$

系统的总功率为

$$P_A = \sum_{k=1}^K P_k \quad (5)$$

其中,  $P_k$  表示第  $k$  个用户所分配的功率, 其表达式为

$$P_k = \frac{\alpha_k P_A}{1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{K-1}} \quad (6)$$

其中,  $\alpha_k$  表示第  $k$  个用户与第  $k+1$  个用户之间的发送功率比 ( $0 < \alpha_k < 1$ )。  $U_1 \sim U_K$  的信道条件是从好到差的, 该用户间功率分配算法可以保证总发送功率保持不变的前提下, 信道更差的用户可以获得更高的功率。

### 2.2 多路信号之间的二维功率分配

在完成用户之间的功率分配之后, 本文针对共照区域用户进一步实施多路信号的二维功率分配, 即根据当前信道来确定不同发送端之间的功率比, 在接收

端得到均匀分布的翻转叠加星座图。当共照区域  $L_3$  与  $L_4$  的用户在进行翻转星座图叠加时, 为了降低叠加编码的复杂性, 本文将所有共照区域用户的接收端星座图采用 2 组不同星座图进行叠加。以共照区域  $L_3$  的用户为例, 在进行星座图叠加时, 有 2 路信号采用重复编码 (RC) 调制, 此时的信道系数是这 2 路 RC 信号的信道相加的结果。

二维功率分配与文献[16]所描述的功率分配的区别在于, 不同的信道情况会导致接收端星座点叠加不均匀, 从而恶化接收端的误码率性能。为此, 本文根据已知的信道信息, 将信道与发送功率都纳入为对接收端叠加星座图结果产生影响的因素, 推导出在当前信道条件下满足翻转叠加星座点的均匀分布时协作 LED 的发送功率比。以 64QAM 叠加星座算法为例, 在发送端接收到的 64QAM 星座信号为

$$S_{64QAM} = P'_{16QAM} S_{16QAM} h_1 + P'_{4QAM} S_{4QAM} h_2 \quad (7)$$

其中,  $P'_{16QAM}$  和  $P'_{4QAM}$  是要重新考虑的发送功率,  $S_{64QAM}$  与  $S_{4QAM}$  是归一化后的星座图信号,  $h_1$  和  $h_2$  是 2 路信道的已知信道状态信息, 可以通过训练序列获得。在满足均匀星座点分布时, 发送端功率需满足

$$\frac{P'_{16QAM}}{P'_{4QAM}} = \frac{2h_2 \sqrt{1+2a^2}}{\sqrt{2} h_1 [d_1 - 2(x_1 + a)]} \quad (8)$$

其中,  $a$  是在 2 个发送端之间, 当以 1:1 的功率叠加出均匀的 64QAM 星座图时, 16QAM 星座图在进行功率归一化之后需要的偏移量;  $x_1$  是 16QAM 星座图功率归一化之后任意一星座点的实部坐标,  $d_1$  是 16QAM 星座图功率归一化之后的最小欧式距离。

综上所述, 本文将二维功率分配算法表示成以下的优化问题:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k=1}^K B_k \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \frac{P_k}{P_{k+1}} = \alpha_k \\ \frac{P'_{16QAM}}{P'_{4QAM}} = \frac{2h_2 \sqrt{1+2a^2}}{\sqrt{2} h_1 [d_1 - 2(x_1 + a)]} \\ \sum_{k=1}^K P_k = P_A \\ P'_{16QAM} + P'_{4QAM} = P_k \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $B_k$  表示第  $k$  个用户的误码率;  $0 < \alpha_k < 1, k=1, 2, \dots$

.,  $K-1$ 。

假定第  $k$  个用户处于共照区域。共照区域内的用户之间进行一维功率分配后, 需要对翻转叠加的星座图进行二维功率分配。为了获得最优的  $\alpha_k$  系数, 本文采用了遗传算法进行求解, 求解过程如算法 1 所示。

#### 算法 1 二维功率分配算法

**输入** 用户数量  $K$ , 每个用户的信道信息  $h$ , 每个用户服务的 LED 个数  $V$

**输出** 最小误码率  $B_{\min}$ , 以及该误码率下的  $K-1$  个  $\alpha$  系数

设置  $M$  为循环总次数,  $m$  为当前循环次数,  $B_{\min}$  为截止到当前循环次数最小误码率

条件初始化, 给定第一个用户的功率

1) While  $m \leq M$  进行遗传算法循环

if  $V=1$ , 判定为非共照区域用户

2) 执行式(4), 利用遗传算法与一维功率分配算法为非共照区域用户分配功率, 得到当前循环次数的误码率  $B(m)$

3) if  $V>1$ , 判定为共照区域用户

4) 执行式(4)与式(8), 利用遗传算法与二维功率分配算法为共照区域用户分配功率, 得到当前循环次数的误码率  $B(m)$

5) if  $B(m) \leq B_{\min}$

6) Set  $B_{\min}=B(m)$

7) if  $B(m) > B_{\min}$

8) 执行下一次循环

9) While  $m > M$

10) end

与文献[10]提出的算法相比, 本文提出的二维功率分配算法的时间复杂度为  $O(n^2)$ ,  $n$  是时间复杂度的通用字符。因此, 该二维功率分配算法不会造成额外的能量损耗。在现有的硬件条件下, 器件可以满足该二维功率分配算法的实验需求。

### 3 仿真结果及分析

本文对提出的多小区协作 VLC 系统的二维功率分配算法进行了仿真及性能分析, 仿真场景、参数分别如图 1、表 1 所示。

在仿真中, 子载波的分配参考文献[20]中的子载波分配算法; 同时, 在满足每个用户的速率请求的基础上, 将剩余的子载波分配给当前通信场景中信噪比条件最好的用户, 以最大化整个系统的传输速率。图 3 是 6 个用户进行一维功率分配与平均功率分配的误

表 1 仿真参数

| 参数                        | 取值                                                                                                                     |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 房间长、宽、高/m                 | 6、6、3                                                                                                                  |
| LED 的半功率角度/(°)            | 30                                                                                                                     |
| PD 的视场角度/(°)              | 50                                                                                                                     |
| PD 有效接收面积/cm <sup>2</sup> | 1                                                                                                                      |
| 子载波个数/个                   | 256                                                                                                                    |
| 调制带宽/MHz                  | 20                                                                                                                     |
| LED 与用户个数/个               | 4、6                                                                                                                    |
| LED 发送功率/mW               | 5                                                                                                                      |
| PD 响应度/(A/W)              | 1                                                                                                                      |
| LED 坐标                    | (1.5 m, 1.5 m, 3 m); (4.5 m, 1.5 m, 3 m); (1.5 m, 4.5 m, 3 m); (4.5 m, 4.5 m, 3 m);                                    |
| 用户坐标                      | (1.6 m, 1.5 m, 1 m); (1.7 m, 4.6 m, 1 m); (4.4 m, 1.8 m, 1 m); (1.4 m, 3 m, 1 m); (5 m, 3 m, 1 m); (3.5 m, 2.8 m, 1 m) |

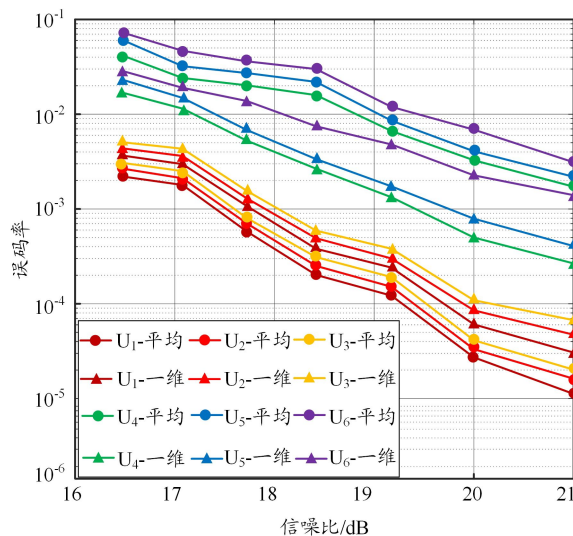


图 3 用户一维功率分配与平均功率分配时的误码率对比曲线图

码率对比曲线图。在用户分布情况中, 用户  $U_1 \sim U_6$  的信道质量逐渐变差。在一维功率分配后, 非共照区域  $L_1$  的 3 个用户  $U_1 \sim U_3$  的误码率上升, 这是由于这些用户的信道情况较好, 在功率分配后所分配的功率相对减少, 因此误码率会上升。相反, 共照区域  $L_2$  的 2 个用户  $U_4 \sim U_6$  在进行一维功率分配后, 其误码率是下降的, 这是因为这些用户得到了更高的功率, 从而改善了其通信质量。同理,  $L_3$  中用户  $U_6$  的误码率在一维功率分配之后误码率也会降低。另外, 由于非共照区域的用户

潘超, 郭心悦: 基于 OFDMA 的多小区协作可见光通信系统二维功率分配算法

信道情况更好, 所以在一维功率分配后虽然功率降低, 但是误码率仍会低于共照区域用户。

在执行一维用户间功率分配算法之后, 为了验证二维叠加星座图功率分配算法的优越性, 本文分别给出了 2 个  $L_2$  用户、1 个  $L_3$  用户发送端在不同发送功率比之下的误码率结果, 如图 4 所示。已知  $L_2$  用户有 2 个发送端, 其信道功率比分别为 0.8 : 1 与 0.7 : 1, 而  $L_3$  用户有 3 个发送端, 其信道功率比为 0.2 : 0.2 : 1 (视为 0.4 : 1 的  $L_2$  用户)。可以看出, 当信道存在差异时, 发送端功率比并不是在 1 : 1 的情况下获得最好的误码率性能,  $U_4$ 、 $U_5$  误码率最低时的功率比分别约为 1.22、1.52, 因为  $U_5$  的信道情况要更差, 所以最低误码率比  $U_4$  高。 $U_6$  误码率最低时的功率比约为 2.6, 虽然比  $U_4$ 、 $U_5$  高, 但是因为信道情况最差, 所以最低误码率也比  $U_4$  与  $U_5$  用户高。

图 5 是 6 个用户在不同功率分配算法下的系统平均误码率曲线对比图。可以看出, 在进行一维功率分配后, 系统平均误码率要比平均功率分配算法的误

码率低。这表明, 将更多的功率分配给信道条件较差的用户, 相比于恶化信道条件好的用户的性能, 能够带来更高的性能增益。与平均功率分配算法相比, 一维功率分配算法的误码率性能平均提升了 16%。在进行二维功率分配时, 根据当前的信道状况, 通过最佳功率比率来分配不同 LED 协同工作的发送端功率, 从而得到均匀的叠加星座图。与一维功率分配算法相比, 二维功率分配算法的误码率性能平均提升了 10%。

## 4 结束语

本文针对 VLC 一般场景下的多小区多用户分布的干扰问题, 提出了一种基于 OFDMA 的多小区协作 VLC 系统, 并为了进一步降低误码率, 提出了一种多用户之间的二维功率分配算法。仿真结果表明: 与平均功率分配算法相比, 一维功率分配算法误码率性能平均提升了 16%; 与一维功率分配算法相比, 二维功率分配算法误码率性能平均提升了 10%。本文的研究成果可应用于多小区一般场景, 为消除多小区多用户干扰, 降低系统的误码率提供了新思路。

## 参考文献:

- [1] CHI N, ZHOU Y J, WEI Y R, et al. Visible light communication in 6G: advances, challenges, and prospects[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 93–102.
- [2] HONG W B, BEAK K H, KO S. Millimeter-wave 5G antennas for smartphones: overview and experimental demonstration [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6250–6261.
- [3] VRIES J P D, SIMIC L, ACHTZEHN A, et al. The Wi-Fi 'congestion crisis': regulatory criteria for assessing spectrum congestion claims [J]. Telecommunications Policy, 2014, 38(8): 838–850.
- [4] MATHEUS L E M, VIEIRA A B, VIEIRA L F M, et al. Visible light communication: concepts, applications and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3204–3237.
- [5] HAN C, WANG Y Q, LI Y B, et al. Terahertz wireless channels: a holistic survey on measurement, modeling, and analysis [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(3): 1670–1707.
- [6] ZOU P, ZHAO Y H, HU F C, et al. Enhanced performance of MIMO multi-branch hybrid neural network in single receiver MIMO visible light communication system[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 28017–28032.
- [7] 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.
- [8] YU B Y, ZHANG H M, WEI L, et al. Subcarrier grouping OFDM for visible-light communication systems [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 7903812–1–7903812–12.
- [9] NG D W K, LO E S, SCHÖBER R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(9): 3292–3304.

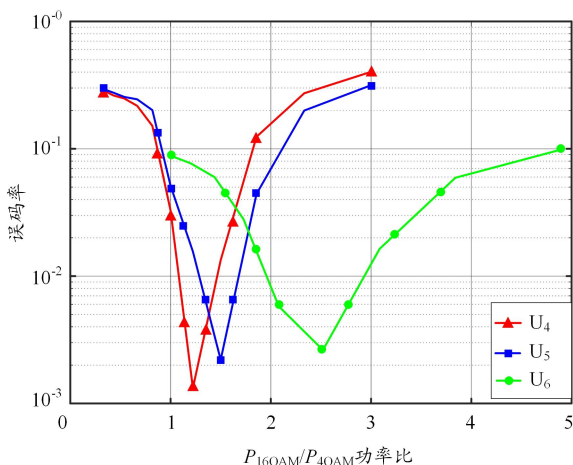


图 4 共照区域用户发送端不同功率比时的误码率曲线图

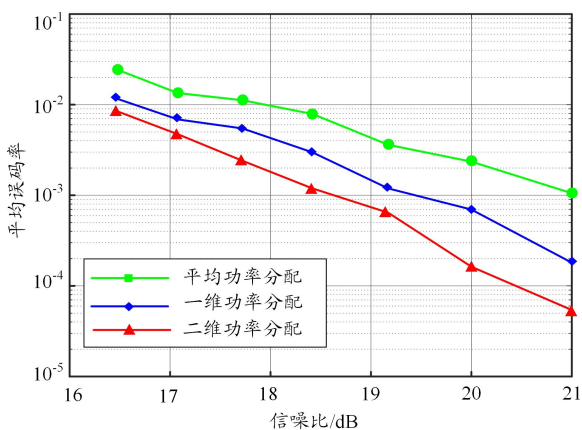


图 5 不同功率分配算法下的系统平均误码率曲线对比图

- [10] CHEN C, TANG Y, CAO Y, et al. Fairness-aware hybrid NOMA/OFDMA for bandlimited multi-user VLC systems [J]. Optics Express, 2021, 29(25): 42265–42275.
- [11] LIAN J, PEARCE M B. Multiuser visible light communication systems using OFDMA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(21): 6015–6023.
- [12] XU J J, GONG C, LUO J H, et al. LED half-power angle optimization for ultra-dense indoor visible light communication network deployment[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020(1): 835–848.
- [13] YANG H L, 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.
- [14] 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.
- [15] NASER S, BARIAH L, JAAFAR W, et al. Coordinated beam forming design for multi-user multi-cell MIMO VLC networks [J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 7329910-1–7329910-10.
- [16] GUO X Y, YUAN Y S, ZHAO Y H, et al. Flipped superposed constellation design for MIMO visible-light communication systems[J]. Optics Express, 2022, 30(7): 11588–11603.
- [17] ELTOKHEY M W, KHALIGHI M A, GHASSEMLOOY Z. Dimming-aware interference mitigation for NOMA-based multi-cell VLC networks[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(11): 2541–2545.
- [18] SHI J, WANG Y, CHI N, et al. Enhanced performance using STBC aided coding for LED -based multiple input single output visible light communication network [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015, 57(12): 2943–2946.
- [19] FENG S M, ZHANG R, XU W, et al. Multiple access design for ultra-dense VLC networks: orthogonal vs non-orthogonal [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(3): 2218–2232.
- [20] SHI J, HE J, WU K Q, et al. Enhanced performance of asynchronous multi-cell VLC system using OQAM/OFDM-NOMA [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(20): 5212–5220.