

引用本文:沈媛,郭心悦.混合 NOMA/OFDMA 可见光通信系统资源分配算法[J].光通信技术,2024,48(2):24-29.

# 混合 NOMA/OFDMA 可见光通信系统资源分配算法

沈媛,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:**为了进一步降低混合非正交多址/正交频分复用多址(NOMA/OFDMA)技术的多用户多小区可见光通信系统的误码率,提出了一种功率和子载波的联合分配算法。该算法以最小化系统误符号率为优化目标,实现了子小区间载波和用户功率的联合最优分配。首先,理论推导出系统的误符号率表达式;然后,使用 Matlab 软件进行仿真,模拟可见光通信系统模型,并借助遗传算法得到最优的分配结果;最后,将该算法与现有的算法进行了对比。仿真结果表明,所提算法的误符号率性能更优。

**关键词:**可见光通信;非正交多址;正交频分复用多址;资源分配

**中图分类号:**TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)02-0024-06

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.02.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Resource allocation algorithm of hybrid NOMA/OFDMA visible light communication system

SHEN Yuan, GUO Xinyue\*

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

**Abstract:** In order to further reduce the bit error rate of multi-user multi-cell visible light communication systems using non-orthogonal multiple access/orthogonal frequency division multiple access(NOMA/OFDMA) technology, a joint power and subcarrier allocation algorithm is proposed. This algorithm aims to minimize the system's symbol error rate by achieving the joint optimal allocation of carrier and user power across sub-cells. Firstly, the symbol error rate expression of the system is theoretically derived. Then, Matlab software is used to simulate the visible light communication system model, and the optimal allocation results are obtained through genetic algorithms. Finally, the proposed algorithm is compared with existing algorithms. The simulation results show that the symbol error rate performance of the proposed algorithm is superior.

**Key words:** visible light communication, non-orthogonal multiple access, orthogonal frequency division multiple access, resource allocation

### 0 引言

在可见光通信(VLC)系统中,常用的多址方式有正交频分复用多址(OFDMA)<sup>[1-2]</sup>和非正交多址(NOMA)<sup>[3-6]</sup>。OFDMA通过给用户分配正交的子载波来实现多用户的接入,不同用户使用不同的频谱资源,因此用户间不存在相互干扰,但它限制了每个用户使用

收稿日期:2023-08-18。

**作者简介:**沈媛(1997—),女,江苏扬州人,硕士研究生,本科毕业于常州工学院电子信息工程专业,并荣获优秀毕业生的称号。目前就读于上海理工大学信息与通信工程专业,主要研究方向为可见光通信中的信号处理技术。

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



有限的频谱资源,导致频谱效率不高。NOMA通过功率域复用各用户的数据,所有用户都可使用所有的频谱,从而提高了系统的频谱资源利用率。但NOMA方案也存在不可避免的用户间干扰。为了同时利用OFDMA和NOMA的优势<sup>[7-12]</sup>,研究学者提出了一种混合NOMA/OFDMA技术。文献[7]首次提出了一种用于双向VLC传输的NOMA/OFDMA方案,该方案具有高容错性、高光谱效率和高系统容量的特点。在此方案中,用户可以根据需要选择使用部分或全部子载波进行数据传输,而使用相同子载波的用户则通过功率域复用进行区分。文献[8]则提出了一种结合了NOMA和OFDMA特性的新型混合多址技术。该技术将频谱划分为多个资源块,部分资源块采用OFDMA方式进行

复用,而其余资源块则供所有用户使用 NOMA 方式进行复用。这种混合多址接入方案相较于传统的 NOMA 方案具有明显优势。文献[9]解决了将 NOMA 和 OFDMA 一起用于下行多址时的联合功率最优和资源分配问题,为 VLC 系统的实际应用提供了理论基础。文献[10]首次提出并实验验证了一种用于带限多用户 VLC 系统的公平感知混合 NOMA/OFDMA 方案。该方案采用了一种交错的子载波复用方法和二维功率分配策略,以确保系统的公平性。在此系统中,该方案根据信道增益对用户进行排序并划分用户对,配对的用户采用 NOMA 方式,而不同用户对间则采用 OFDMA 接入。文献[11]在具有带宽约束信道的 VLC 系统中研究了一种基于 NOMA/OFDMA 的混合多用户接入方案。该方案提出了一种新的用户资源分配方法,旨在减少由于 VLC 系统的高频衰落特性造成的不同用户之间的不公平性,从而提高系统容量。

然而,以上文献对于混合 NOMA/OFDMA 技术的研究主要聚焦于单小区的多用户 VLC 系统。在实际的室内环境中,由于单个发光二极管(LED)的照明覆盖范围有限,通常需要部署多个 LED 以提供足够的照明,因此构成了一个多小区多用户的通信场景。文献[12]在这一背景下,首次将混合 NOMA/OFDMA 技术拓展至多小区多用户 VLC 系统。该方案将每个小区划分为几个子小区,使用 OFDMA 方式进行复用,同一子小区内的多用户则通过 NOMA 进行复用。该研究还提出了一种针对混合 NOMA/OFDMA VLC 系统的二维功率分配算法。该算法基于固定功率分配策略,旨在最小化系统的平均误符号率(SER)。但是,该功率分配算法依赖于 2 个固定的功率比值,无法实现用户间功率的灵活分配。此外,该研究并未考虑载波的最优分配问题,而是采用了平均分配的策略,在不同的子小区间进行分配。针对上述问题,本文基于混合 NOMA/OFDMA 技术的多小区多用户 VLC 系统,提出一种功率和子载波的联合分配算法,旨在实现更高效的资源利用和系统性能优化。

## 1 混合 NOMA/OFDMA VLC 系统

### 1.1 多小区多用户室内 VLC 场景

多小区多用户室内 VLC 场景图如图 1 所示。该场景中有 11 个用户( $U_1 \sim U_{11}$ )随机分布在 4 个光小区(一个 LED 所照射的范围为一个光小区)。其中,LED 的投影区域可分为 4 种类型,分别用  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$  表示,下标表示在相应区域中可以接收信号的 LED 数量。图

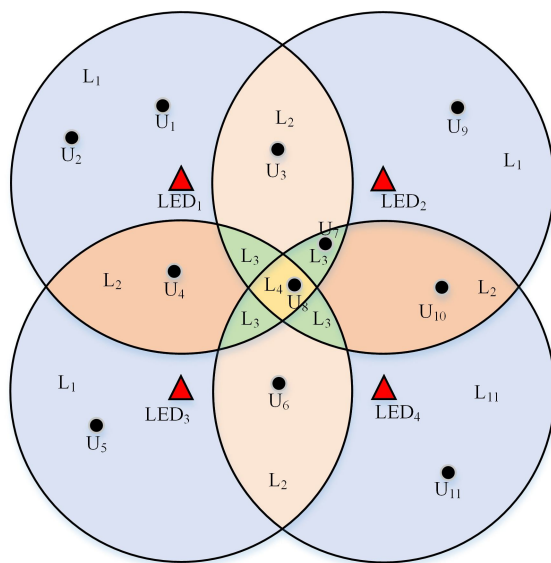
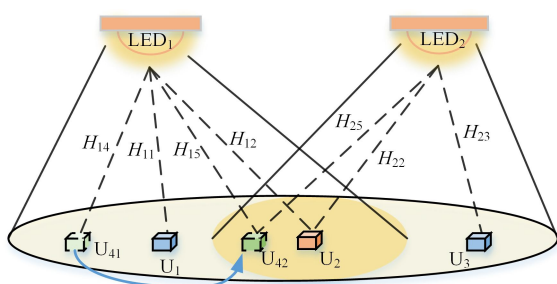


图 1 多小区多用户室内 VLC 场景图

中的 5 种不同颜色对应不同的频谱资源。其中,淡粉色和深粉色的  $L_2$  区域分别对应 2 块不同的频谱,且  $L_3$  区域与其同一小区内的  $L_2$  区域共享频谱。由于  $L_4$  区域范围较小,用户存在的概率比较小,为避免干扰,本文给  $L_4$  区域的用户额外分配了一小段频谱。 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_5$ 、 $U_9$  和  $U_{11}$  均位于非共照区域,由其所在小区的 LED 提供照明和通信服务,因  $U_1$  和  $U_2$  位于同一个子小区,故在功率域上复用。图中位于淡粉色和深粉色区域的用户均由相邻的 2 个 LED 协同通信,如  $LED_2$  和  $LED_4$  发送相同的数据给  $U_{10}$ ,因此  $U_{10}$  接收到的信号为 2 路信号之和。位于绿色区域的用户为 3 个 LED 共照区域,这个区域的用户可以同时使用淡粉色和深粉色区域对应的频谱。例如, $U_7$  可以同时传输 2 路独立的数据:一路数据使用淡粉色区域对应的频谱,由  $LED_1$  和  $LED_2$  协同通信,并在此功率域上与  $U_3$  的数据复用;另一路数据使用深粉色区域对应的频谱,由  $LED_2$  和  $LED_4$  协同通信,并在此功率域上与  $U_{10}$  的数据复用。黄色区域表示 4 个 LED 共照区域,单独分配一段频谱,位于该区域的  $U_8$  能同时接收到 4 个 LED 发送的数据。

简化的 VLC 场景图如图 2 所示。该简化场景由 2 个 LED 和 4 个用户组成,每个小区都包含共照和非共照区域。共照区域被定义为一个子小区,而非共照区域则被定义为另一个子小区。不同子小区间采用 OFDMA 方式进行信号复用,而同一子小区内的用户则通过 NOMA 方式进行信号复用。处于共照区域的用户能够同时接收到来自 2 个 LED 的信号。 $U_1$  和  $U_4$  处于非共照区域,它们之间通过 NOMA 复用; $U_2$  和  $U_3$  处于共照区域,它们之间通过 NOMA 复用。而  $LED_1$  和



$H_{mn}$ : 第  $m$  个 LED 到第  $n$  个用户间的频域信道频率响应

图 2 简化的 VLC 场景图

LED<sub>2</sub> 的共照区域与非共照区域之间,以及不同子小区之间,都是通过 OFDMA 进行复用的。

## 1.2 系统模型

发射端和接收端的信号处理流程框图如图 3 所示。

在发射端,随机生成 2 个独立的二进制数据流,这些数据流根据信号的传输要求、信道条件等不同情况,被映射成  $M$  阶正交幅度调制 ( $M$ -QAM) 信号。同时,系统中的反馈路径负责监控和调整子载波的分配,以确保信号的有效传输。同一个子小区内不同用户调制后的信号经功率分配后在功率域上叠加的结果  $X$  可表示为

$$X = \sum_{u=1}^W \sqrt{P_{d,u}} s_{d,u} \quad (1)$$

其中,  $s_{d,u}$  表示第  $d$  个 LED 发送的第  $u$  个用户的  $M$ -QAM 信号,  $P_{d,u}$  表示分配给该用户的功率,  $W$  表示子小区内总的用户数。

在 VLC 系统中,信号会被叠加并映射到相应的子载波上。为了满足系统只能发送实信号的条件,需要进行厄米特共轭对称操作,其中一半的子载波用于传

输有效数据的实部,另一半用于传输这些数据的共轭对称值。接着,通过上采样和逆快速傅里叶变换 (IFFT) 的组合,实现正交频分复用 (OFDM) 调制。调制后的信号会插入循环前缀 (CP),这是为了减少多径干扰和保持信号的正交性。最后,OFDM 调制后的信号与直流分量叠加,以驱动 LED 进行光信号发送。当用户处于非共照区域时,发送信号仅通过一个 LED 发送,如图 3(a) 所示;而当用户处于共照区域时,发送信号需要加载到多个 LED 上,例如 2 个 LED 同时发送相同的信号,如图 3(b) 所示。

在接收端,所进行的操作是发送端的逆过程。每个用户都能接收到一个或多个 LED 发送的信号。经过 OFDM 解调后,第  $u$  个用户接收到的信号  $Y_u$  可表示为

$$Y_u = R_p \sum_{d=1}^D \sum_{u=1}^W \sqrt{H_{d,u}} s_{d,u} + N_u \quad (2)$$

其中,  $R_p$  是光电二极管 (PD) 的响应度,  $H_{d,u}$  为第  $d$  个 LED 到第  $u$  个用户间的频域信道频率响应;  $N_u$  为第  $u$  个用户端的噪声,可近似看成是一个高斯白噪声,其均值为零,方差为  $\sigma_u^2$ 。  $D$  表示该用户能接收到信号的 LED 数。如果用户处于非共照区域,则  $D=1$ ;若用户处于共照区域,则  $D=2$ 。

经过 OFDM 解调和信道均衡后,采用串行干扰抵消 (SIC) 算法,每个用户能从叠加信号中提取出自己的信号并进行 QAM 解调,恢复出原始的比特数据流。

## 2 功率和子载波联合分配算法

为优化整个系统的 SER 性能,本文在多小区多用户混合 NOMA/OFDMA VLC 系统中提出一种功率和

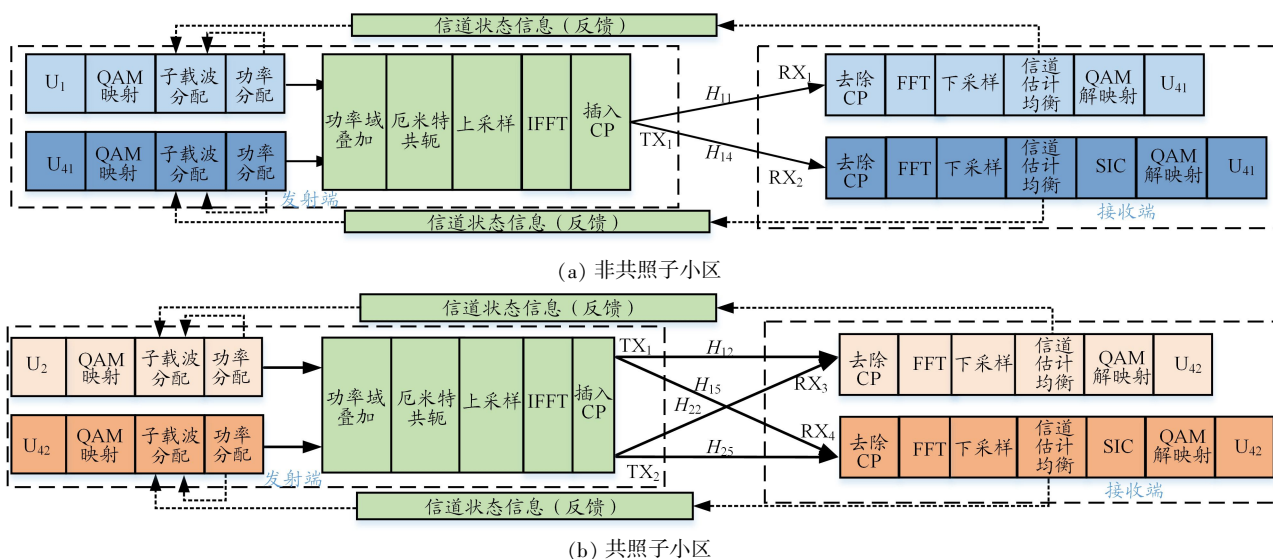


图 3 发射端和接收端信号处理流程框图



子载波的联合分配算法。基于所建立的系统模型,以系统 SER 最小为优化目标,建立了功率和子载波分配的最优化方程,如式(3)所示。

$$Z = \min_{P_{c,u}^k} \left( \sum_{u=1}^W \frac{\sum_{j=1}^N x_u(j) S_u(j)}{\sum_{j=1}^N x_u(j)} \right) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} C_1: P_{c,u}^k \geq 0, 0 < c < N_{\text{total}}, 0 < u < N_y, 0 < k < N_z \\ C_2: \sum_{u=1}^W P_{c,u}^g < \sum_{u=1}^W P_{c,u}^f \\ C_3: P_{\text{total}}^c = \sum_{u=1}^W P_{c,u}^g + \sum_{u=1}^W P_{c,u}^f, P_{\text{total}}^c = P_{\text{total}}^{c+l} \\ C_4: x_u^{c,g}(j) + x_u^{c,f}(j) \leq 1 \\ C_5: \sum_{j=1}^N x_u(j) = r \end{cases}$$

其中,  $S_u(j)$  表示第  $u$  个用户在第  $j$  个子载波上的 SER,  $P_{c,u}^k$  表示第  $c$  个光小区的第  $k$  个子小区内的第  $u$  个用户的功率,  $r$  表示每个子小区分得的子载波数,  $N_{\text{total}}$  表示 LED 总数,  $N_y$  表示总用户数,  $N_z$  表示子小区总数。  $P_{c,u}^g$  表示第  $c$  个光小区中共照子小区的第  $u$  个用户的功率,  $P_{c,u}^f$  表示第  $c$  个光小区中非共照子小区的第  $u$  个用户的功率,  $P_{\text{total}}^c$  表示第  $c$  个光小区的总功率,  $N$  表示子载波总数。  $x_u^{c,g}(j)$ 、 $x_u^{c,f}(j)$  分别表示第  $c$  个光小区内共照子小区的用户和非共照子小区的用户。  $x_u(j)$  用以指示子载波的分配情况,如式(4)所示。

$$x_u(j) = \begin{cases} 1, & \text{第 } j \text{ 个子载波分给第 } u \text{ 个用户} \\ 0, & \text{第 } j \text{ 个子载波未分给第 } u \text{ 个用户} \end{cases} \quad (4)$$

约束条件  $C_1$  表示每一个用户的功率不能为负;约束条件  $C_2$  表示在同一个光小区内的非共照子小区的用户功率需要大于共照子小区的用户功率;约束条件  $C_3$  表示每个光小区的用户功率总和不能超过一个预先设置的值;约束条件  $C_4$  说明在同一个光小区内,每个子载波只能分给同一光小区内的一个子小区;约束条件  $C_5$  预先规定了每个用户分得的子载波数量。

由于 NOMA 复用的用户在接收端通过 SIC 算法实现解码,因此可能存在误差传递。根据文献[12]可知, SER 的推导需考虑 2 种情况:无误差传递和有误差传递。即具有最高功率的用户最先解码,最先解码的用户不存在误差传递,而剩余用户则都需要考虑误差传递的问题。

以图 1 中  $U_4$  位于  $\text{LED}_1$  光小区的非共照区域( $U_{41}$ )为例,当调制阶数为 4QAM 时,其 SER 为

$$S_{41} = Q(\lambda_{11} + \lambda_{12}) + Q(\lambda_{11} - \lambda_{12}) - \frac{1}{4} Q^2(\lambda_{11} + \lambda_{12}) - \frac{1}{4} Q^2(\lambda_{11} - \lambda_{12}) - \frac{1}{2} Q(\lambda_{11} + \lambda_{12}) Q(\lambda_{11} - \lambda_{12}) \quad (5)$$

其中,  $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$ ,  $\lambda_{11} = \frac{R_p H_{14} \sqrt{P_{41}}}{\sigma_u}$ ,  $\lambda_{12} = \frac{R_p H_{14} \sqrt{P_1}}{\sigma_u}$ ,  $H_{14}$  表示  $U_{41}$  的信道频域响应,  $P_{41}$  表示  $U_{41}$  的功率,  $P_1$  表示  $U_1$  的功率,  $\sigma_u$  表示第  $u$  个用户的噪声标准差。

而  $U_1$  解码会受到误差传递的影响,其 SER 为

$$S_1 = S_{11} + S_{12} \quad (6)$$

$S_{11}$  为无误差传递项的 SER,其表达式为

$$S_{11} = \left\{ 1 - \left[ Q(\lambda_{21} + \lambda_{22}) + Q(\lambda_{21} - \lambda_{22}) - \frac{1}{4} Q^2(\lambda_{21} + \lambda_{22}) - \frac{1}{4} Q^2(\lambda_{21} - \lambda_{22}) - \frac{1}{2} Q(\lambda_{21} + \lambda_{22}) Q(\lambda_{21} - \lambda_{22}) \right] \right\} \times [2Q(\lambda_{22}) - Q^2(\lambda_{22})] \quad (7)$$

其中,  $\lambda_{21} = \frac{R_p H_{11} \sqrt{P_{41}}}{\sigma_u}$ ,  $\lambda_{22} = \frac{R_p H_{11} \sqrt{P_1}}{\sigma_u}$ ,  $H_{11}$  表示  $U_1$  的信道频域响应。

$S_{12}$  为有误差传递项的 SER,其表达式为

$$S_{12} = \frac{1}{4} \times \{ \{ 2[Q(\lambda_{21} - \lambda_{22}) - Q^2(\lambda_{21} + \lambda_{22})][Q(\lambda_{22}) + Q(\lambda_{22} - 2\lambda_{21}) - Q(\lambda_{22})Q(\lambda_{22} - 2\lambda_{21})] + Q^2(\lambda_{21} - \lambda_{22})[2Q(\lambda_{22} - 2\lambda_{21}) - Q^2(\lambda_{22} - 2\lambda_{21})] \} + 2[Q(\lambda_{21} + \lambda_{22}) + Q(\lambda_{21} - \lambda_{22}) - 2Q(\lambda_{21} + \lambda_{22}) \times Q(\lambda_{21} - \lambda_{22})][Q(\lambda_{22}) + Q(\lambda_{22} - 2\lambda_{21}) - Q(\lambda_{22})Q(\lambda_{22} - 2\lambda_{21})] + Q(\lambda_{21} + \lambda_{22}) \times Q(\lambda_{21} - \lambda_{22})[Q(\lambda_{22} - 2\lambda_{21}) + Q(\lambda_{22} - 2\lambda_{21}) - Q(\lambda_{22} - 2\lambda_{21})Q(\lambda_{22} + 2\lambda_{21})] \} + \{ 2[Q(\lambda_{21} + \lambda_{22}) - Q^2(\lambda_{21} + \lambda_{22})][Q(\lambda_{22}) + Q(\lambda_{22} + 2\lambda_{21}) - Q(\lambda_{22})Q(\lambda_{22} + 2\lambda_{21})] + Q^2(\lambda_{21} + \lambda_{22})[2Q(\lambda_{22} + 2\lambda_{21}) - Q^2(\lambda_{22} + 2\lambda_{21})] \} \} \quad (8)$$

求解上述最优化方程可归纳为以下 3 个步骤:

第一步,初始化每个用户的功率。计算每个用户在每个子载波上的 SER,分别取非共照区域和共照区域 SER 最大的 2 个用户组成一个矩阵  $G$ ,如式(9)所示。

沈媛,郭心悦:混合 NOMA/OFDMA 可见光通信系统资源分配算法

$$\mathbf{G}=[\max(S_{41}, S_1, S_3); \max(S_{42}, S_2)] \quad (9)$$

其中,  $S_2, S_3, S_{42}$  分别表示  $U_2, U_3, U_{42}$  的 SER。

为了最小化系统的 SER,需要进行子载波到用户的分配。首先,按照降序排列每个用户在每个子载波上的 SER,然后对于每一列(每个子载波),找到 SER 最小的用户,并将该子载波分配给该用户。这个过程需要不断循环,直到所有的子载波都被分配完毕。

第二步,基于子载波分配结果,以式(3)为目标函数,引入遗传算法求得每个用户的最优功率分配  $P_{c,u}^g$  和  $P_{c,u}^f$ 。

第三步,重复第一步和第二步,迭代直至收敛。

具体的求解算法如算法 1 所示。

#### 算法 1 联合功率与子载波资源分配算法

**输入** 总用户数  $N_u$ , LED 总数  $N_{\text{total}}$ , 子载波总数  $N$ , 共照子小区内的用户数  $Z_c^g$  和非共照子小区内的用户数  $Z_c^f$ , 噪声方差  $\sigma^2$ , 信道增益矩阵  $H_{N_{\text{led}} \times N_u}$ , 每个 LED 的总功率  $P_i$ , 每个子小区分得的子载波数  $r$

**输出** 各用户的功率,最小 SER

1) 初始化每个用户的功率

2) for  $t=1:T$  ( $t, T$  分别表示表示循环次数、循环总次数)

3) 算出每个用户在每个子载波上的  $S_i(n)$ , 接着将非共照区和共照区用户对应的 SER 按降序排列组成一个矩阵  $\mathbf{G}_{2 \times N}$

4) for  $n=1:N$

5) 将较小值对应的子载波分配给对应的子小区

if 某一子小区已分得  $r$  个子载波

6) 未分配的子载波直接分给另一子小区

7) end if

8) end for

9) 随机产生种群  $P_{c,u}^g \in (0, P_{\text{total}}/2W_c^g), P_{c,u}^f \in (P_{\text{total}}/2W_c^f, P_{\text{total}}/W_c^g)$ , 以式(3)为目标函数,使用遗传算法找到最优功率分配  $P_{c,u}^g$  和  $P_{c,u}^f$

10)end for

### 3 仿真与结果分析

本文利用仿真平台对所提出的算法进行了详尽的性能评估,并将其与文献[12]中的算法进行了深入的比较。在仿真过程中,特别考虑了 2 种典型的通信场景:一是某一非共照子小区存在多个用户,二是共照子小区存在多个用户。此外,本文还探讨了 2 种不

同的子载波分配策略。策略一旨在最小化 SER 的同时,确保子小区的公平性,使得每个子小区都能分配到相等数量的子载波,即  $r=N/2$ 。而策略二则仅关注 SER 的最优化,因此在分配子载波时,仅要求每个子小区至少分配到一个子载波,即满足  $\min(r)>0$  的条件。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

| 名称                     | 数值                |
|------------------------|-------------------|
| 房间长/m、宽/m、高/m          | 7、7、4             |
| LED 半功率角 /( $^\circ$ ) | 45                |
| PD 视场半角 /( $^\circ$ )  | 45                |
| PD 接收面积/ $\text{cm}^2$ | 1                 |
| PD 响应度/(A/W)           | 1                 |
| 子载波数/个                 | 256               |
| OFDM 调制带宽/MHz          | 20                |
| LED <sub>1</sub> 的位置   | (1 m, 0 m, 3.8 m) |
| LED <sub>2</sub> 的位置   | (5 m, 0 m, 3.8 m) |
| LED 功率/mW              | 2                 |

仿真场景一如图 4 所示,  $U_{41}$  位于 LED<sub>1</sub> 的非共照区域。其中  $U_1, U_2, U_3, U_{41}, \text{LED}_1$  和 LED<sub>2</sub> 的坐标分别为 (0.7 m, 0 m, 0.8 m)、(3 m, 0 m, 0.8 m)、(5.3 m, 0 m, 0.8 m)、(0 m, 0 m, 0.8 m)、(1 m, 0 m, 3.8 m)、(5 m, 0 m, 3.8 m)。可以看出,  $U_1$  和  $U_{41}$  位于 LED<sub>1</sub> 的非共照子小区,  $U_2$  位于 LED<sub>1</sub> 和 LED<sub>2</sub> 的共照子小区,  $U_3$  位于 LED<sub>2</sub> 的非共照子小区。在该场景下,  $U_1$  和  $U_{41}$  数据的调制格式为 4QAM,  $U_2$  和  $U_3$  数据的调制格式都为 16QAM。其中,  $U_1$  和  $U_{41}$  之间使用 NOMA 方式共享频谱资源;  $U_2$  和  $U_1, U_{41}$  之间,  $U_2$  和  $U_3$  之间使用 OFDMA 方式。

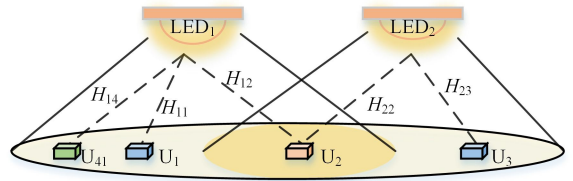


图 4 仿真场景一

仿真场景一的不同策略的 SER 对比情况如图 5 所示。可以看出,本文提出的 2 种策略的 SER 性能都优于文献[12]算法的性能。但当采用策略一时,由于牺牲了系统的 SER 性能,即部分子载波并没有分配给能使系统 SER 最小的用户,因此,系统的 SER 性能也有所下降。

仿真场景二如图 6 所示,  $U_{42}$  位于 LED<sub>1</sub> 和 LED<sub>2</sub> 的共照区域。其中,  $U_1, U_2, U_3, U_{42}, \text{LED}_1$  和 LED<sub>2</sub> 的坐标分别为 (0.7 m, 0 m, 0.8 m)、(3 m, 0 m, 0.8 m)、(5.3 m,

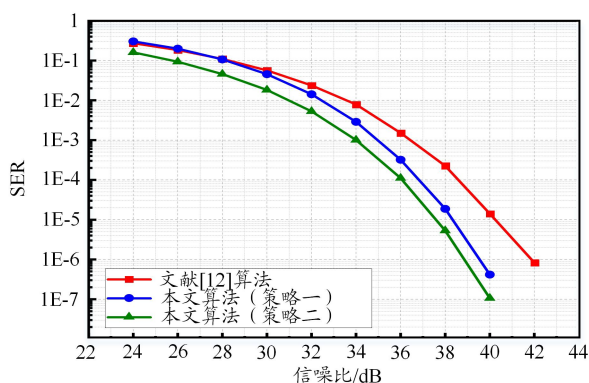


图5 仿真场景一的不同策略的SER对比情况

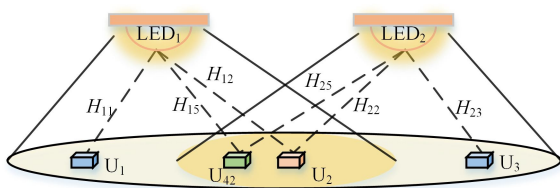


图6 仿真场景二

0 m, 0.8 m)、(2.5 m, 0 m, 0.8 m)、(1 m, 0 m, 3.8 m)、(5 m, 0 m, 3.8 m)。该场景下2个用户  $U_2$  和  $U_{42}$  位于  $LED_1$  和  $LED_2$  的共照子小区, 因此, 他们在共照区域通过 NOMA 复用。 $U_1$  和  $U_3$  分别位于  $LED_1$  和  $LED_2$  的非共照子小区。这时,  $U_1$  和  $U_3$  数据的调制格式为 16QAM,  $U_2$  和  $U_{42}$  数据的调制格式为 4QAM。

仿真场景二的不同策略的 SER 对比情况如图 7 所示。可以看出, 与仿真场景一结论相同, 本文提出的 2 种策略比文献[12]算法具有更好的 SER 性能; 与策略二相比, 采用策略一的 SER 性能有所下降。

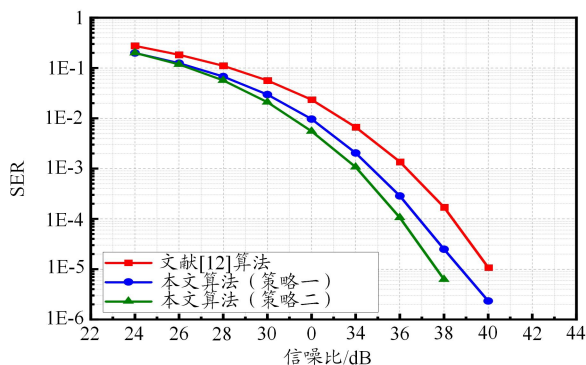


图7 仿真场景二的不同策略的SER对比情况

## 4 结束语

本文在多小区多用户的混合 NOMA/OFDMA VLC 系统中提出一种功率和子载波的联合分配算法。以整

个系统的 SER 最小为优化目标, 建立了功率和子载波分配的最优化方程, 并提出了求解的方法。在仿真分析中, 本文考虑了 2 种典型通信场景, 并兼顾考虑了用户公平性的情况。仿真结果表明, 与现有算法相比, 本文提出的联合分配算法具有更优的 SER 性能; 当兼顾考虑用户公平性时, 系统的 SER 性能会略有降低。

## 参考文献:

- [1] LIAN J, BRANDT-PEARCE M. Multiuser visible light communication systems using OFDMA [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38 (21): 6015–6023.
- [2] SUNG J Y, YEH C H, CHOW C W, et al. Orthogonal frequency-division multiplexing access (OFDMA) based wireless visible light communication (VLC) system[J]. Optics Communications, 2015, 355: 261–268.
- [3] ANZAGIRA A, EDMONSON W. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for LED-based visible light inter-satellite communications [C]//2018 6th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE), December 11–13, 2018, Huntsville, USA. New York: IEEE, 2018: 24–29.
- [4] DONG Z Y, SHANG T, LI Q, et al. Differential evolution-based optimal power allocation scheme for NOMA-VLC systems [J]. Optics Express, 2020, 28(15): 21627–21640.
- [5] CHEN C, ZHONG W D, YANG H, et al. On the Performance of MIMO-NOMA-based visible light communication systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(4): 307–310.
- [6] YIN L, POPOOLA W O, WU X, et al. Performance evaluation of non-orthogonal multiple access in visible light communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(12): 5162–5175.
- [7] LIN B, YE W, TANG X, et al. Experimental demonstration of bidirectional NOMA-OFDMA visible light communications [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 4348–4355.
- [8] AL-ABBASI Z Q, SO D K C. Resource allocation in non-orthogonal and hybrid multiple access system with proportional rate constraint [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(10): 6309–6320.
- [9] BELIS P, BONNEFOI R, FARES H, et al. Optimal power and resource allocation for transmit power minimization in OFDMA-based NOMA networks [C]//2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), April 15–18, 2019, Marrakesh, Morocco. Piscataway: IEEE, 2019: 1–7.
- [10] CHEN C, TANG Y R, CAI Y P, et al. Fairness-aware hybrid NOMA/OFDMA for bandwidth limited multi-user VLC systems[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 42265–42275.
- [11] FAN K, WANG J P, CHEN D Y, et al. Hybrid multi-user access scheme for a visible light communication system [J]. Applied Optics, 2022, 61(26): 7552–7557.
- [12] GUO X Y, LUO Y. Hybrid NOMA/OFDMA visible light communication system with coordinated multiple point transmission [J]. Optics Express, 2022, 30(26): 47404–47420.