

## 基于非正交多址的室内可见光通信系统性能优化方法

张 峰, 梁渊博\*, 赵 黎, 梁 源

(西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘 要:** 室内可见光通信 (Visible Light Communication, VLC) 系统常用的非对称限幅光 OFDM (Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing, ACO-OFDM) 与直流偏置光 OFDM (DC-biased Optical OFDM, DCO-OFDM) 采用加循环前缀、信道均衡和载波复用等方法解决信道干扰及多用户复用问题, 但均以牺牲有效性为代价。非正交多址 (Non-orthogonal Multiple Access, NOMA) 通过功率域复用提高频谱利用率, 利用串行干扰消除 (Successive Interference Cancelling, SIC) 进行多用户信号处理, 有效兼顾可靠性与有效性。将 NOMA 应用于室内可见光系统, 建立基于 NOMA-DCO-OFDM 的可见光信号传输及信道增益模型。通过功率域多用户信道差异计算信道增益, 进行功率分配实现功率域复用, 提高系统容量和通信速率; 利用 SIC 按功率分配算法对用户逐一解调, 减弱信道干扰, 提高可靠性。通过理论分析和仿真实验验证表明: 该系统的通信速率达到  $6.8 \times 10^7 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且合速率受用户数量的影响不显著。2 用户下, 误码率 (Bit Error Rate, BER) 为  $10^{-4}$  时用户 1 有 5.2 dB 左右的性能提升, 用户 2 有 2.3 dB 左右的性能提升, 通信可靠性也明显提高。

**关键词:** 可见光通信; 非正交多址; 串行干扰消除; 通信速率; 通信可靠性

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210101

## Performance optimization method of indoor visible light communication system based on non-orthogonal multiple access

Zhang Feng, Liang Yuanbo\*, Zhao Li, Liang Yuan

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Indoor visible light communication (VLC) systems are usually designed based on asymmetric clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (ACO-OFDM) and DC biased optical OFDM (DCO-OFDM). These system models usually use CP, channel equalization and carrier multiplexing to solve the problems of channel interference and multi-user multiplexing. But these are at the expense of effectiveness. Non-orthogonal multiple access (NOMA) improves spectrum utilization by sub-carrier multiplexing in power domain, and uses serial interference cancellation (SIC) for multi-user signal processing. It is an effective method to balance communication reliability and effectivity. An indoor VLC system based on NOMA was proposed, and a VLC signal transmission and channel gain model based on NOMA-DCO-OFDM were established. According to channel gain of multi-user, the power allocation of NOMA was carried out to realize the multiplexing in power domain and improve the capacity of system and the communication rate. SIC was used to demodulate the multi-user signals one by one according to the power allocation algorithm to reduce channel interference and improve the reliability of the system. Theoretical analysis and experimental verification show that the communication rate

收稿日期: 2021-02-09; 修订日期: 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61271362); 陕西省科技厅一般项目-工业领域 (2020GY-055); 西安市科技计划 (2020KJRC0040)

作者简介: 张峰, 教授, 硕士, 主要从事现代通信技术、可见光通信、智能信息处理与控制等方面的研究。

通讯作者: 梁渊博, 男, 硕士生, 主要从事可见光通信方面的研究。

of the system reaches  $6.8 \times 10^7 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ , the combined rate is not significantly affected by the number of users, and the communication efficiency is significantly improved. For 2 users, when BER is  $10^{-4}$ , user 1 has about 5.2 dB performance improvement, user 2 has about 2.3 dB performance improvement, the communication reliability is also improved.

**Key words:** visible light communication; non-orthogonal multiple access; successive interference cancelling; communication rate; communication reliability

## 0 引言

可见光通信 (VLC) 利用可见光波作为通信载体, 在满足照明需求的同时实现高速信息传输<sup>[1]</sup>。室内 VLC 常用的开关键控调制 (On-Off Keying, OOK)、单极性脉冲位置调制 (Pulse Position Modulation, PPM) 以及脉冲幅度调制 (Pulse Amplitude Modulation, PAM) 等方式较容易产生码间干扰, 难以保障通信速率和可靠性。OFDM 可以很好地解决符号间干扰等问题, 同时还利于提升系统的频谱利用效率, 但也存在着峰均比较高、通信速率与可靠性难以保证的问题<sup>[2-3]</sup>。

参考文献 [4-5] 在 ACO-OFDM 中通过基带信号频率调制提升系统可靠性和有效性, 但未考虑多用户时系统性能的变化。参考文献 [6] 在 VLC 中引入多入多出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 以应对多用户问题, 提高了系统容量和可靠性, 但频域资源未充分利用。参考文献 [7-8] 将 MIMO 与 OFDM 联合复用, 采用功率比特分配提高速率, 但在多用户时, 用户间公平性难以有效保障。为进一步开发功率域资源并保证用户公平性, 参考文献 [9-10] 研究了可见光通信中的多址接入技术, 提出将 NOMA 应用于 VLC 中以提升用户接入量和通信速率, 并研究了不同功率分配算法、探测器接收角度对系统速率的影响。然而这些文献只是对基带信号进行简单调制, 然后进行功率域复用, 对系统的误码性能和用户公平性缺少对应的分析与验证。

综上, 文中将 NOMA 应用于基于 DCO-OFDM 的室内 VLC 系统, 针对用户信道特征进行功率分配保证用户公平性和通信速率, 通过复用功率域和频域以提高系统的频谱利用率和通信速率; 利用串行干扰消除进一步降低误码率, 提高通信系统可靠性。

## 1 室内 VLC 系统信道特征

将 VLC 信道理想化为线性时不变系统, 建立室

内 VLC 系统光源辐射模型如图 1 所示。

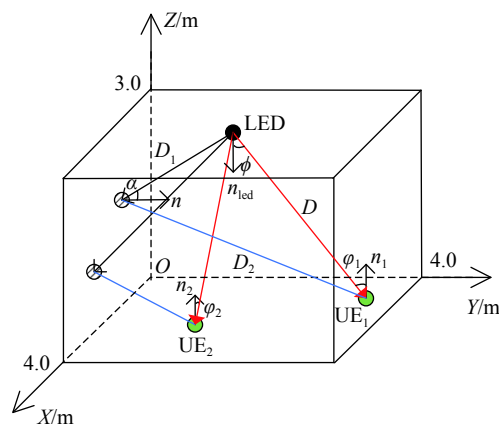


图 1 VLC 系统的几何场景辐射模型

Fig.1 Geometric scene radiation model of VLC system

VLC 信道的冲激响应  $h(t)$  表示为:

$$h(t; R_t; R_r) = \sum_{k=0}^{\infty} h_E^{(k)}(t; R_t; R_r) \quad (1)$$

式中:  $R_t$  为发射端特征;  $R_r$  为接收端特征;  $k$  为光传输中的反射次数。对接收端冲激响应, 通常将发射端  $t=0$  时发射的脉冲视为功率 1 W 的冲激响应<sup>[11]</sup>, 可表示为:

$$h(t; R_t; R_r) = T(\phi) \frac{A_r \times \cos(\varphi)}{D^2} \delta\left(t - \frac{D}{c}\right) \quad (2)$$

式中:  $T(\phi)$  为发射端辐射模式, 文中采取朗伯辐射模式;  $\phi$  为 LED 发射角;  $A_r$  为接收器面积;  $\varphi$  为光电探测器 (PD) 入射角;  $c$  为光速;  $D = |\vec{R}_t - \vec{R}_r|$  为收发端间距离。以用户 1 为例, 位置为  $(x_i, y_i, 0)$ , 方向矢量  $n_1$  与其入射光线夹角为  $\varphi_1$ , 由图 1 可具体表示为:

$$D = \frac{3}{\cos \phi} = \frac{3}{\cos \varphi_1} \quad (3)$$

在 LED 光源的朗伯辐射模式中有:

$$T(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi) \quad (4)$$

式中:  $m$  为朗伯指数。因此  $h(t)$  可表示为:

$$H_E = \frac{P_r}{P_t} = \frac{(m+1)Ar \times \cos(\varphi)}{2\pi D^2} \cos^m(\phi) \quad (5)$$

$R_t$ 与 $R_r$ 之间的直流增益 $H_{DC}$ 表示为:

$$H_{DC}(0; R_t; R_r) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t; R_t; R_r) dt \quad (6)$$

结合公式 (5) 与公式 (6),  $H_{DC}$ 可表示为:

$$H_{DC}(0; R_t; R_r) = \frac{(m+1)Ar \times \cos(\varphi)}{2\pi D^2} \cos^m(\phi) \quad (7)$$

接收器的信号功率为:

$$P_r = P_t H_{DC}(0; R_t; R_r) \quad (8)$$

式中:  $P_t$ 为发射端功率;  $P_r$ 为接收端功率。进一步推导得到信道增益为:

$$H_E = \frac{P_r}{P_t} = \frac{(m+1)Ar \times \cos(\varphi)}{2\pi D^2} \cos^m(\phi) \quad (9)$$

设定  $m = 1$ ,  $Ar = 1 \text{ cm}^2$ ,  $\phi = 70^\circ$ ; 房间大小  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ; 光源位置为 (2,2,3), 得到信道增益的仿真图如图 2 所示, 其中,  $x$  轴与  $y$  轴表示室内的位置,  $z$  轴表示信道增益。

由图 2 可知, 边缘位置处用户信道增益大, 因其信道环境差, 故需分配较多功率保证信息传输的正确性。而中心位置处的用户信道增益小, 因此可分配较少的功率。根据公式 (9) 计算出的信道增益进行 NOMA 用户的功率分配可有效保证多用户系统的公平性。

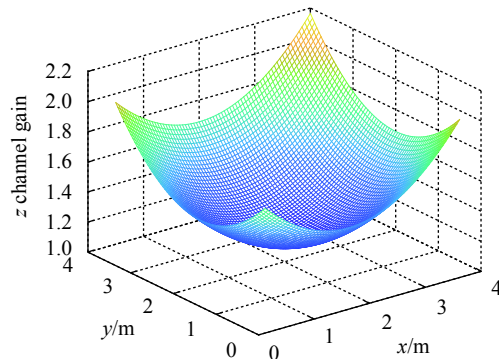


图 2 室内 VLC 系统的信道增益仿真图

Fig.2 Channel gain simulation diagram of indoor VLC system

## 2 基于 NOMA-DCO-OFDM 的 VLC 通信系统

考虑下行传输, LED 发送  $i$  个用户的信号, 接收端采用 SIC 检测, 系统框图如图 3 所示。

发送端, 将各用户产生的比特流进行 M-QAM 调制, 然后根据用户信道增益关系进行功率分配和叠加编码。叠加编码后信号经 DCO-OFDM 调制驱动 LED 进行信号传输。接收端, 经光信道的信号被光电探测器接收, 接收信号经 DCO-OFDM 解调后, 采用 SIC 进行  $N$  用户的区分, 最后将各用户信息进行 M-QAM 解调形成接收比特流。

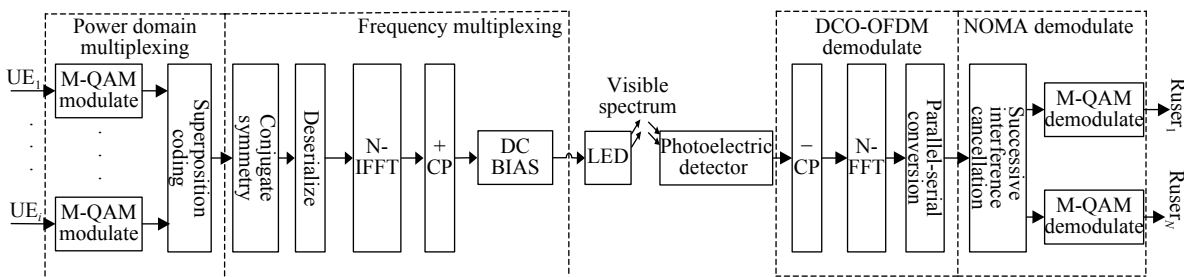


图 3 基于 NOMA-DCO-OFDM 的 VLC 系统原理框图

Fig.3 VLC system schematic diagram based on NOMA-DCO-OFDM

## 3 基于 NOMA-DCO-OFDM 的 VLC 系统信号处理

### 3.1 功率域复用

根据室内 VLC 系统的信道特性, 假设用户  $i$  的位置为  $(x_i, y_i, 0)$ , 光源位置为 (2,2,3), 根据公式 (3) 可求得

两者之间的距离为:

$$D = \frac{3}{\cos \phi} = \frac{3}{\cos \varphi_1} = \sqrt{(x_i - 2)^2 + (y_i - 2)^2 + (0 - 3)^2} \quad (10)$$

根据用户信道增益进行功率分配, 结合公式 (9) 与公式 (10), 用户  $i$  的信道增益为:

$$H_i = \frac{(m+1)Ar \times \cos(\varphi)}{2\pi[(x_i-2)^2 + (y_i-2)^2 + 9]} \cos^m(\phi) \quad (11)$$

则第  $i$  个用户分配的功率为:

$$P_i = P_t \alpha_i \quad (12)$$

式中:  $P_i$  为用户  $i$  的功率;  $\alpha_i$  表示功率分配因子<sup>[12]</sup>, 且  $0 \leq \alpha_i \leq 1$ , 其具体值为:

$$\alpha_i = \frac{H_i}{\sum_{i=1}^i H_i} \quad (13)$$

假设用户  $i$  发射信号为  $X(i) = P_i e^{-j\omega t}$ ,  $\omega$  为相位, 各信号平均功率为 1, 即  $E[|X(i)|^2] = 1$ , 经星座映射与叠加编码的调制符号为:

$$\hat{X}(i) = P_i \alpha_i e^{-j\omega t} \quad (14)$$

### 3.2 DCO-OFDM 调制

为将调制后的信号实数化, 需要对频域 OFDM 符号结构进行共轭对称处理<sup>[10]</sup>, 同时保证  $X_0 = X_{N/2} = 0$ , 如下:

$$\hat{X}(i)_{co} = [0, X_1(i), \dots, X_{N/2-1}(i), 0, X_{N/2-1}(i)^*, \dots, X_1(i)^*] \quad (15)$$

共轭对称后进行 IFFT, 得到用户  $i$  的信号为:

$$\hat{X}(i)_r = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{X}(i)_{co} \exp\left(\frac{j2\pi\omega n}{N}\right) \quad (16)$$

式中:  $\exp()$  表示指数运算, 双极性信号  $\hat{X}(i)$  在添加循环前缀并附加直流偏置以保证信号的非负性后, 最终形成待传输信号, 驱动 LED 光源进行通信信号传输。

### 4 基于 SIC 的信号检测及性能分析

发送信号通过室内光信道后被用户给接收, 接收信号可表示为:

$$Y = \sum_{i=1}^i \sqrt{p_i} H_i \hat{X}(i)_r + n \quad (17)$$

结合公式 (11) 可表示为:

$$Y = \sum_{i=1}^i \sqrt{p_i} \frac{(m+1)Ar \times \cos(\varphi)}{2\pi[(x_i-2)^2 + (y_i-2)^2 + 9]} \times \cos^m(\phi) \hat{X}(i)_r + n \quad (18)$$

式中:  $n$  为噪声;  $N_0$  为功率谱密度。为提高可靠性, 文中在系统中采用 SIC 减小用户间干扰。相应的多用户信号检测原理如图 4 所示。图 4 中, 假设  $p_1 > p_2$ , 先将 UE<sub>2</sub> 信号看做噪声, 解调出 UE<sub>1</sub> 信号, 然后从接收

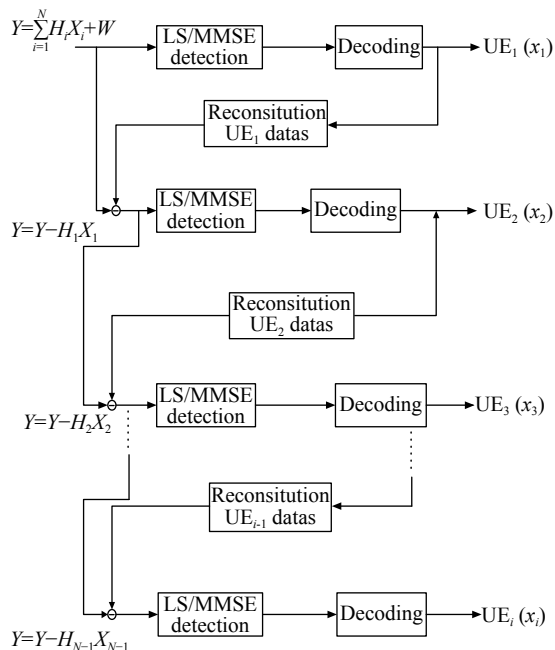


图 4 SIC 检测原理图

Fig.4 Schematic diagram of SIC test

信号  $Y$  中减去 UE<sub>1</sub> 信号, 再解调出 UE<sub>2</sub> 信号, 以此类推, 直到解调出用户 UE<sub>i</sub> 的信号。

在 2 用户下, 减去用户 1 信号后, 系统存在的干扰仅为高斯白噪声, 则用户 2 最大可达速率为单用户的界限。NOMA 用户的速率可用表述为:

$$\begin{cases} R_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_1 |H_1|^2}{p_2 |H_2|^2 + N_0} \right) \\ R_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_2 |H_2|^2}{N_0} \right) \end{cases} \quad (19)$$

对 OFDM 系统, 不同用户占用相互正交频谱, 其中  $\beta$  Hz 带宽分配给用户 1,  $(1-\beta)$  Hz 带宽分配给用户 2, 因此用户间不存在相互干扰, 用户速率<sup>[11,13]</sup> 可表示为:

$$\begin{cases} R_1 = \beta \log_2 \left( 1 + \frac{p_1 |H_1|^2}{\beta N_0} \right) \\ R_2 = \left( (1-\beta) \log_2 \left( 1 + \frac{p_2 |H_2|^2}{(1-\beta) N_0} \right) \right) \end{cases} \quad (20)$$

在可见光通信中, 用户  $i$  在第  $m$  个子信道的信噪比<sup>[10]</sup> 如下式所示:

$$\Gamma_{SINR,i}(m) = \frac{\gamma^2 \rho^2 H_i p_i}{\gamma^2 \rho^2 H_i \sum_{i=1}^i p_i + \gamma^2 H_i \sigma_{clip}^2 + 1} \quad (21)$$

式中:  $\gamma$  为光电转换因子, 假设  $\gamma = 1A/W$ ;  $\rho$  为限幅尺度衰减因子,  $\sigma_{clip}$  为限幅噪声的标准差。用户  $i$  在第

$m$  个子信道的和速率<sup>[10]</sup>为:

$$R_i(m) = \frac{W_i}{2} \log_2 [1 + \Gamma_{SINR,i}(m)] \quad (22)$$

式中:  $W_i$ 表示用户  $i$  的带宽, 共轭对称使频带利用率降低一半。可以看出, 当总功率为定值时, 整个系统的合速率会受功率分配影响, 因而系统合速率与用户功率分配有关<sup>[14]</sup>。

## 5 仿真实验及性能分析

在图 1 的室内环境模型下对系统通信速率与误码率性能进行仿真分析与实验验证。

### 5.1 通信速率分析

仿真设置 LED 位于屋顶中心处, 光电转化因子为 1, 光电探测器如图 1 所示分布在房间地面, 其他仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameter

Parameter	Value
LED Optical power/W	1
Modelation bandwidth/Hz	$5 \times 10^7$
LED transmitting angle/(°)	75
Subcarrier bandwidth/Hz	$1.56 \times 10^6$
FOV at PD/(°)	70
Physical area of PD/cm <sup>2</sup>	1

NOMA-DCO-OFDM 系统用户数为 10, 采用 16QAM 调制, 64 个子信道, IFFT/FFT 点数  $N=128$ , 功率分配采用公式 (12) 的分配算法。仿真得到的室内 VLC 系统用户数和通信速率之间的关系曲线如图 5 所示。

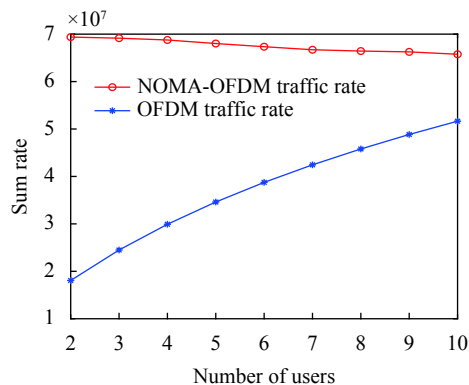


图 5 基于 NOMA 与基于 OFDM 的 VLC 系统通信速率

Fig.5 Comparison of NOMA-based and OFDM-based VLC system communication rate

由图 5 可知, 基于 OFDM 的 VLC 系统通信速率不稳定, 随用户数量增多, 速率呈指数型增大。而基于 NOMA 的 VLC 系统通信速率稳定, 随用户数量增多, 其合速率有所下降, 但并不明显。同时, NOMA-DCO-OFDM 系统的通信速率明显高于 DCO-OFDM 系统。

### 5.2 通信可靠性分析

以 2 用户系统为例, 将用户 1 设置在室内边缘处, 用户 2 设置在室内中心处, 仿真参数与表 1 一致。在下行系统的并串转换后, 首先基于星座图进行可靠性的分析, 其次根据误码率曲线进行可靠性定量分析, 仿真得到的接收端用户 1 和用户 2 星座图如图 6 所示。

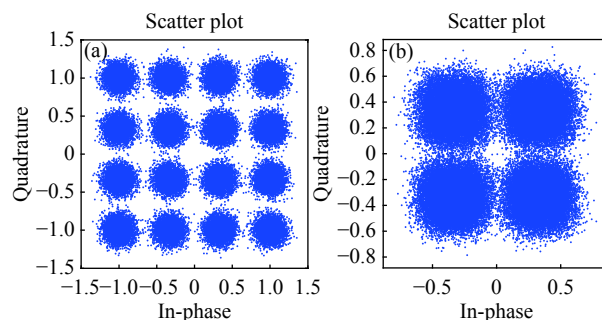


图 6 解调之前用户 1 和用户 2 星座图。(a) 用户 1; (b) 用户 2

Fig.6 User 1 and user 2 constellation before demodulation. (a) User 1; (b) User 2

对星座图采用调制误差率 (Modulation Error Rate, MER) 分析, 其定义如下:

$$MER = 10 \lg \frac{\sum_{j=1}^k (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^k (\delta I_j^2 + \mu Q_j^2)} \quad (23)$$

式中:  $I_j$ 和 $Q_j$ 为理想星座图中数据点;  $\delta I_j$ ,  $\mu Q_j$ 为接收数据点与理想点的差值;  $k$ 表示星座图点数。对 64QAM, MER 经验门限值为 23.5 dB, 调制阶次越低, 要求的经验门限值越低。由公式 (23) 进行 MER 计算, 得到用户 1 MER 值为 25.9 dB, 用户 2 MER 值为 26.3 dB, 均大于门限值。

采用蒙特卡洛方法进行误码率计算, 仿真得到的两用户误码率性能曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 误码率为  $10^{-4}$  时, 对于用户 1,

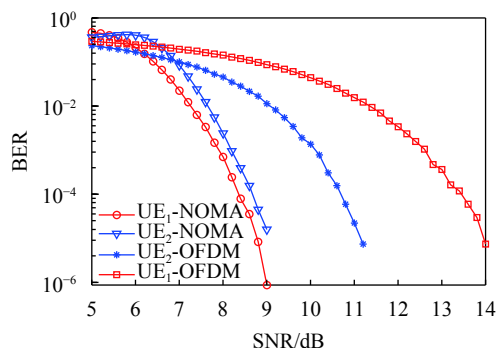


图 7 BER 性能曲线

Fig.7 BER performance curve

NOMA 系统相较 OFDM 系统有 5.2 dB 左右的性能提升; 对于用户 2, NOMA 系统相较 OFDM 系统有 2.3 dB 左右的性能提升。进一步, NOMA 系统用户间误码率性能差异明显小于 OFDM 系统。表明 NOMA 提高了通信可靠性, 并保证了用户公平性。

### 5.3 实验验证

为验证文中提出的 NOMA-DCO-OFDM 系统, 进行半实物实验。图 8 所示为包含发送模块与接收模块。将 LED 和 PD 放置在导轨上, 传输距离设置为 35 cm, LED 型号 4.8 mm LISUNG, 光电探测器型号为 LSSAPD9-500, 聚光片为凸透镜。

发送端由上位机产生 2 用户 NOMA-DCO-OFDM 信号, 经任意信号发生器将信号传输给可见光发送模块, 激励 LED 传输信号。接收端, 用示波器观察接收信号的波形, 与发送端的波形对比验证系统通信的可行性; 同时通过数字示波器采集并由分析软件进行解调验证通信性能。图 8 为信号发生器输入的连续的 2 用户功率域叠加后的发送波形, 在示波器上显示的接收波形, 通过对比收发前后波形发现, 接收波形和

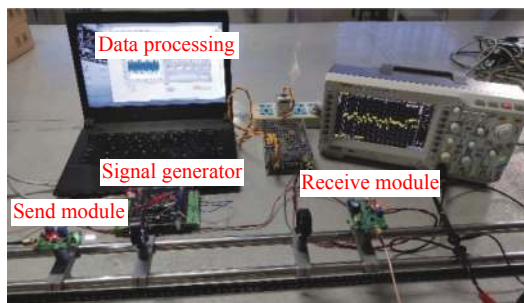


图 8 NOMA-DCO-OFDM 实验环境

Fig.8 NOMA-DCO-OFDM experimental environment

发送波形的频率基本一致, 验证了文中所提出的可见光通信系统的合理性。通过把发送端生成的 2 用户通信数据和接收端接收并解调出的 2 用户通信数据进行对比分析, 验证了文中所提出的可见光通信系统的性能。

## 6 结论

理论研究、仿真分析及实验验证表明, NOMA-DCO-OFDM 能够提高室内 VLC 系统性能。根据信道特征所推导的信道增益进行功率分配, 对信道利用更合理, 频谱利用率更高。带宽一定时, NOMA 系统的通信速率高于 OFDM 系统, 虽然随着用户数增加, 通信速率有所下降, 但并不显著。SIC 在 NOMA 系统中有重要作用, 提高了通信可靠性, 通信误码率明显低于 OFDM 系统。实验室环境中所进行的基于 NOMA-DCO-OFDM 的室内 VLC 系统实验表明所提出的通信系统合理, 能够保证通信可靠性。相较于近年来 NOMA 系统的研究工作, 在文中提出的基于 NOMA-DCO-OFDM 的室内 VLC 系统中, 用户间的通信速率及可靠性差异不明显, 用户公平性更加良好。

### 参考文献:

- [1] Jia K J, Yang B R, Lu H, et al. LED nonlinearity mitigation for visible light communication optical-orthogonal frequency division multiplexing system with symbol decomposing techniques [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0406002. (in Chinese)
- [2] Ma X, Yang F, Liu S, et al. Channel estimation for wideband underwater visible light communication: A compressive sensing perspective [J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 311-321.
- [3] Jiang H Y, Qiu H B, He N, et al. Optical OFDM spatial diversity system in lognormal fading UVLC channels [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203008. (in Chinese)
- [4] Singh V K, Dalal U D. Abatement of PAPR for ACO-OFDM deployed in VLC systems by frequency modulation of the baseband signal forming a constant envelope [J]. *Optics Communications*, 2017, 393: 258-266.
- [5] Singh V K, Dalal U D. Integration of frequency modulated constant envelope technique with ADO-OFDM to impede PAPR in VLC [J]. *Optics Communications*, 2018, 418: 80-87.
- [6] Zhao L, Zhu T, Huo J, et al. Application of concatenation codes in visible MIMO communication system [J]. *Infrared and Laser*

- Engineering*, 2019, 48(3): 0322002. (in Chinese)
- [7] Guo X Y, Li S S, Guo Y, et al. Adaptive STBC MIMO-OFDM system design for indoor visible light communications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0222001. (in Chinese)
- [8] Chen Mengru, Lu Huimin, Chen Danyang, et al. An efficient MIMO-OFDM VLC system of combining space time block coding with orthogonal circulant matrix transform precoding [J]. *Optics Communications*, 2020, 473: 125993.
- [9] Zhao Qiong, Jiang Jing, Wang Yanwen, et al. A low complexity power allocation scheme for NOMA-based indoor VLC systems [J]. *Optics Communications*, 2020, 463: 125383.
- [10] Jia K J, Hao L, Bai L J, et al. Indoor visible light communication system based on non orthogonal multiple access [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0806004. (in Chinese)
- [11] Ke X Z, Kang Y, Liu J. Experimental research on PAPR reduction algorithms in FSO-OFDM system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0622001. (in Chinese)
- [12] Xu W Y, Tang T, Duan T D, et al. Research on energy-efficient resource allocation for user-centric visible light communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1577-1587. (in Chinese)
- [13] Gao S J, Wu J B, Liu Y K, et al. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1171-1181. (in Chinese)
- [14] Wang H Q, Yang S X, Li Y T, et al. Double spatial modulation suitable for atmospheric laser communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 565-572. (in Chinese)