

文章编号:1007-5321(2020)01-0111-05

DOI:10.13190/j.jbupt.2019-018

# PDMA 的可见光通信系统

申晓欢, 林邦姜, 汤璇, 许俊翔

(中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究所, 泉州 362216)

**摘要:** 提出了一种基于新型非正交多址接入技术——图样分割多址接入(PDMA)技术的可见光通信系统. PDMA 技术可同时优化多用户可见光通信系统的发送端和接收端,实现非正交传输. 在发送端,在相同的时域和频域资源内,为实现资源复用,需要将多个用户信号的功率域、空域、编码域进行单个或多个联合编码. 接收端进行多用户检测时,采用消息传递算法优化可见光通信系统的整体性能. 相比于正交频分复用多址接入技术,PDMA 技术在支持用户数量方面能够提供 150% 的过载增益. 对可见光通信系统进行了理论分析、模拟仿真和实验验证,实验结果表明,在有限的 LED 带宽约束下,当误码率达到  $10^{-3}$  时,传输距离可达 120 cm.

**关键词:** 图样分割多址接入; 可见光通信; 正交频分复用多址接入

中图分类号: TN011

文献标志码: A

## Study on PDMA Based Visible Light Communication Systems

SHEN Xiao-huan, LIN Bang-jiang, TANG Xuan, XU Jun-xiang

(Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes of Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362216, China)

**Abstract:** A visible light communications (VLC) system based on non-orthogonal multiple access technology – pattern division multiple access (PDMA), is proposed. PDMA technology can simultaneously optimizes the transmitter and receiver of a multi-user VLC system to achieve non-orthogonal transmission. To achieve the resources reuse at the transmitter under the conditions of frequency domain at the same time, it is necessary to use the joint coding of power, space and channel coding of the multiusers. The multiuser detection at the receiver is, based on message passing algorithm, to optimize the performances of VLC. PDMA can support 150% overload gain of the number of users compared with orthogonal frequency division multiplexing access. Simulation verification of the VLC system is carried out and shows that the transmission distance can achieve 120 cm for the bit error rate of  $10^{-3}$  with limited bandwidth of LEDs.

**Key words:** pattern division multiple access; visible light communication; orthogonal frequency division multiplexing access

由于可见光通信技术(VLC, visible light communications)拥有丰富的频谱资源,且免频谱许可,保密安全性高,成本低,抗电磁干扰,成为近几年的研究热点<sup>[1]</sup>. 限制 VLC 系统高速传输的主要原因之

一是发光二极管(LED, light emitting diode)的带宽有限. LED 主要分为荧光粉 LED 和红绿蓝 LED. 与红绿蓝 LED 相比,荧光粉 LED 成本较低,在 VLC 系统被广泛使用,但是其较低的调制带宽限制了通信

收稿日期: 2019-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61601439)

作者简介: 申晓欢(1994—),女,硕士生.

通信作者: 汤璇(1984—),女,研究员, E-mail: xtang@fjirsm.ac.cn.

速率<sup>[2]</sup>. 为提高 LED 调制带宽, 国内外研究学者提出不同的方法, 包括多址技术、多载波调制、多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 和均衡技术<sup>[3]</sup>. 在多址技术下, 有正交多址技术 (OMA, orthogonal multiple access), 如时分多址和正交频分多址 (OFDMA, orthogonal frequency division multiplexing access) 等; 还有非正交多址技术 (NOMA, non-orthogonal multiple access), 指信号在时域和频域重叠, 可提供更高的数据吞吐量和更高的频谱效率. NOMA 被认为是下一代无线通信物理层的关键技术之一, 受到学术界和工业界的广泛关注.

图样分割多址接入 (PDMA, pattern division multiple access) 技术是一种新型的非正交多址接入技术. 笔者设计的系统采用 PDMA 技术来提高荧光粉 LED 的带宽效率. 在发送端进行 PDMA 编码对发送器中发送的二进制数据进行编码, 在接收端通过消息传递算法 (MPA, message passing algorithm) 检测用户信息, 测得误码率. Chen 等<sup>[4]</sup>在 PDMA 性能分析中, 传输相同数量的比特源, 采用相同的调制方式, 当信噪比足够高时, 过载率为 150% 的 PDMA 技术的频谱效率是 OFDMA 技术的 1.5 倍, 提高了频谱效率<sup>[4]</sup>. Chen 等<sup>[4-7]</sup>仅对 PDMA 技术进行了仿真, 目前尚无学者对 PDMA 技术在可见光通信中的应用进行研究. 笔者将 PDMA 技术应用于可见光通信系统, 对 PDMA 技术进行仿真, 与 OFDMA 技术做对比, 并对 PDMA-VLC 系统进行实验验证, 测量不同传输距离下的误码率性能, 通过实验和理论相结合的方法验证了 PDMA-VLC 的可行性.

## 1 PDMA 技术的基本原理

PDMA 技术的基本原理是从 MIMO 解码性能分析中得到<sup>[6]</sup>. 多个用户在共享无线资源的情况下, 不同用户处于不同的检测层, 其等效分集度也不同. 第 1 个被检测的用户具有最低的等效分集度, 按照信号强弱的检测次序越往后检测, 用户的等效分集度越高. 为了使在接收端检测的多用户信号有相同的等效分集度, 多用户信号的发送端就需要不相同的发送分集度. 而 PDMA 技术可以在发送端的多个信号域构造不等分集度, 包括功率域、空间域和编码域.

PDMA 的简单模型可表示为

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{H}_{\text{ch}} \mathbf{H}_{\text{PDMA}}) \mathbf{X} + \mathbf{N} = \mathbf{H} \mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{Y}$  表示接收端信号,  $\mathbf{X}$  表示发送端信号,  $\mathbf{N}$  为

噪声信号,  $\mathbf{H}_{\text{ch}}$  表示真实信道,  $\mathbf{H}_{\text{PDMA}}$  表示功率域、空域和码域等特征图样的矩阵函数,  $\mathbf{H} = (\mathbf{H}_{\text{ch}} \mathbf{H}_{\text{PDMA}})$  为等效响应矩阵.

PDMA 图样定义了从用户数据到资源的映射规则. 通过不同的 PDMA 图样将多个用户的数据映射到同一组资源, 从而实现非正交传输. 图 1 给出了 PDMA 图样映射示例, 6 个用户 (UE, user equipment) 在 4 个资源 (RE, resource element) 上进行复用.

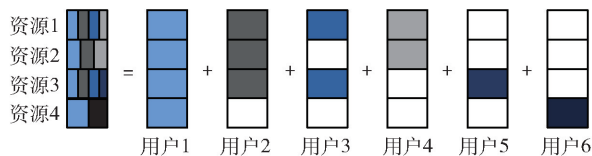


图 1 多用户的 PDMA 资源映射图样

对应的图样矩阵为

$$\mathbf{H}_{\text{PDMA}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

元素“1”表示用户映射到资源上, 元素“0”表示用户在资源上没有进行映射. 如图 1 所示, 用户 1 数据映射到 4 个 RE, 用户 2 映射到前 3 个 RE 等. 6 个用户的传输分集度分别为 4、3、2、2、1、1.

## 2 PDMA-VLC 工作原理

图 2 所示为具有  $K$  个用户的 PDMA-VLC 系统发射端和接收端的信号处理流程. 在发射端, 根据选定的 PDMA 资源映射矩阵设定用户数目  $K$ , 产生二进制的用户比特流, 将用户比特流首先进行星座映射, 然后进入 PDMA 编码模块, 即生成码字组合  $\mathbf{X}$ .  $\mathbf{X}$  进行 OFDM 调制时, 先进行离散傅里叶逆变换. 以图 1 为例, 传输一组携带 6 个用户的数据, 超过 4 个 OFDM 子载波 (SC, subcarrier). 每个 SC 携带来自不同用户的多个调制符号, 实现了 150% 的过载率. 例如, 在 SC1 上, 来自用户 1 ~ 4 的符号彼此重叠, 在 SC2 上, 来自用户 1、2 和 4 的符号彼此重叠. 用户 7 ~ 12 的数据被编码, 并在 SC 5 ~ 8 上扩展, 依次类推, 完成  $K$  个用户数据的编码. IDFT 操作之后, 在每个 OFDM 符号前添加循环前缀 (CP, cyclic prefix), 减低符号间干扰 (ISI, inter-symbol interference). 在每一帧信号前加训练序列, 用来信道估计. 生成的 OFDM 数字信号通过数模转换器转换

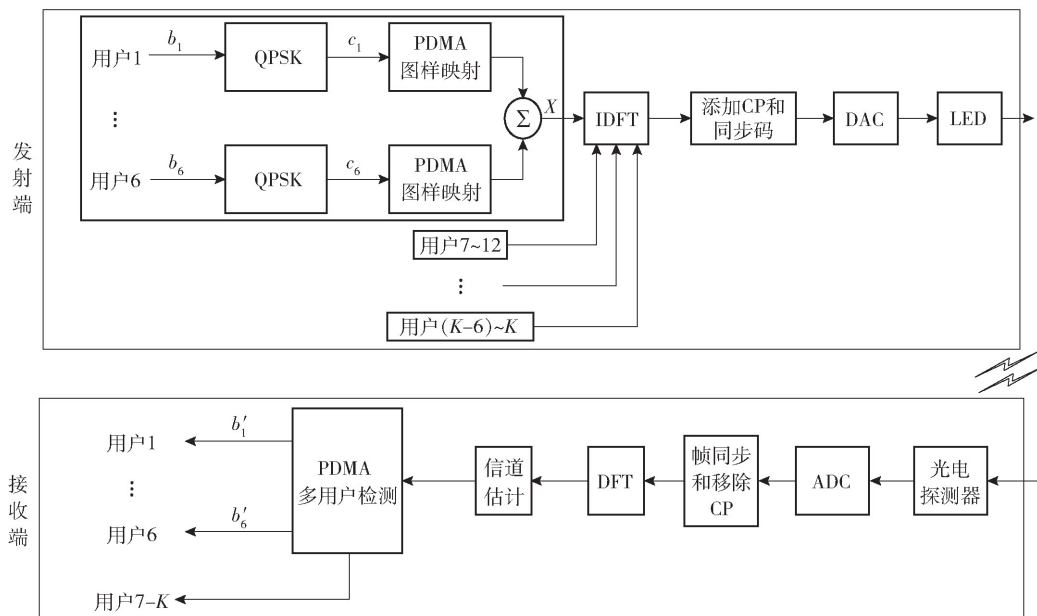


图 2 PDMA-VLC 系统的发射端和接收端信号处理流程

为电信号,电信号通过 LED 转换为光信号在自由光空间中传输. 在接收端,将光电二极管接收到的光信号经过模数转换器转换为数字信号,数字信号首先通过帧同步模块. 在移除 CP 之后,通过离散傅里叶变换(DFT)模块将信号变换到频域. PDMA 多用户检测算法检测出用户数据  $b'_k$ ,与最初发送数据  $b_k$  做对比,得出误码率.

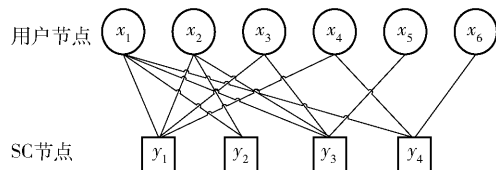
原始的 PDMA 接收端的多用户检测技术采用串行干扰消除(SIC, successive interference cancellation)检测算法,但在实际中,该检测算法的性能由接收机检测的第 1 个用户数据决定. 然而,最开始被检测的用户分集度是最低的,从而导致错误传播. 在本文中,多用户检测算法采用了消息传递算法(MPA, message passing algorithm)<sup>[8]</sup>,可以近似达到最大后验(MAP, maximum a posteriori)算法的效果和性能,而且 PDMA 的不同传输分集度,加速了消息传递算法的收敛,降低了算法复杂度.

解码 MPA 接收机中 SC1 ~ SC4 上的信号时,给定接收信号向量  $\mathbf{y}$  和 PDMA 等效信道响应矩阵  $\mathbf{H}$ , MAP 检测算法中  $\mathbf{x}$  的最优检测为

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x} \in \chi_1 \chi_2 \chi_3 \chi_4 \chi_5 \chi_6} p(\mathbf{x} | \mathbf{y}, \mathbf{H}) \quad (3)$$

计算复杂度为  $O(4^6)$ . PDMA 系统的图样矩阵  $\mathbf{H}_{\text{PDMA}}$  可以由如图 3 所示的因子图来表示.  $\mathbf{H}_{\text{PDMA}}$  取值为 1 的元素对应的用户节点和 SC 节点之间存在一个边,说明第  $j$  个 SC 上的接收信号包括第  $k$  个用户的数据( $1 \leq j \leq 4, 1 \leq k \leq 6$ );取值为 0 则表示不存

在边. 因此,利用图样矩阵的稀疏性,将 MPA 检测算法的复杂度降低为  $O(4^{d_f})$ ,  $d_f$  为作用于 SC 节点的边数. MPA 接收机的详细工作流程见文献[9-10]. 通过解码 MPA 接收机中 SC1 ~ SC4 上的信号,可以恢复出用户 1 ~ 6 的数据,并用相同的办法恢复所有用户的数据.

图 3  $\mathbf{H}_{\text{PDMA}}$  的因子图

### 3 实验设置和结果

PDMA-VLC 系统的实验流程如图 4 所示. 离线状态下,根据图 2 中 PDMA-VLC 发射端信号处理流程,在 Matlab 中进行 PDMA 编码映射,将 Matlab 处理后的数据加载到信号发生器(AWG, arbitrary waveform generator),通过直流电源供电的偏置器加载到 LED 灯. LED 发出的光进入室内大气信道传输,并穿过透镜. 在接收端光电探测器(THORLABS PDA36A)接收光信号,再输送给示波器(RIGOL MSO4054),在示波器上显示信号,经 U 盘读取数据. 最后根据图 2 中 PDMA-VLC 接收端信号处理流程进行 Matlab 离线处理,即 PDMA 解码,从而得出用户信息及其误码率. 图 5 所示为 PDMA-VLC 的实

验图. 表 1 所示为系统的关键参数设置.

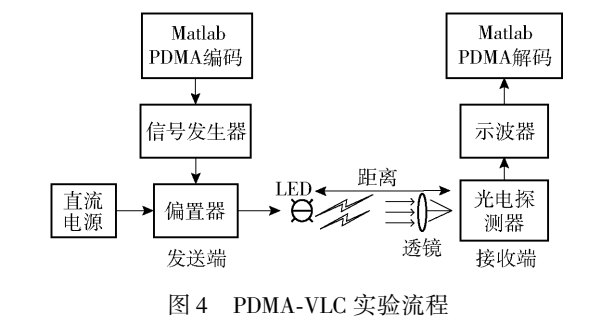


图 4 PDMA-VLC 实验流程

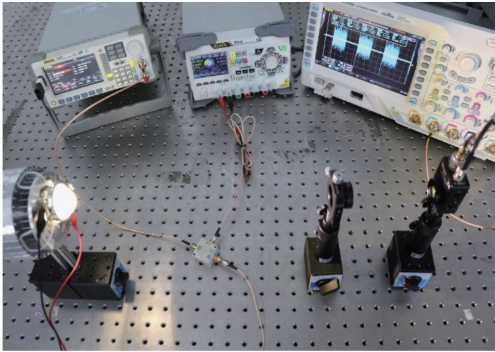


图 5 PDMA-VLC 实验图

表 1 PDMA-VLC 实验参数设置

基本参数		取值
LED	带宽/MHz	~5
	半功率半角/(°)	~60
	发射功率/MW	~180
PIN 光电探测器	有效范围/mm <sup>2</sup>	13
	响应度/(A/W)	<0.44
	带宽/MHz	10
	视场/(°)	~90
PDMA 调制	DFT	256
	CP	8
	用户数	6
	子载波数	4

图 6 所示为 PDMA 仿真结果,由图可见,误码率 (BER, bit error rate) 性能随着迭代次数的增加而提高. 当迭代次数为 4, SNR 为 23 dB 时,误码率已经达到  $10^{-4}$  以下. 如图 7 所示, PDMA 的仿真结果与传统的 OFDMA 相比,在相同的信噪比下, BER 性能略有下降,这是因为在相同的资源下, PDMA 技术传输了更多的数据. 提高一定的信噪比, PDMA 技术达到与 OFDMA 相同 BER 性能的同时,能够提供 150% 过载增益.

图 8 所示为 AWG 的采样速率为 31 MS/s, 迭代次数为 5 时, PDMA-VLC 系统在不同距离下的误码

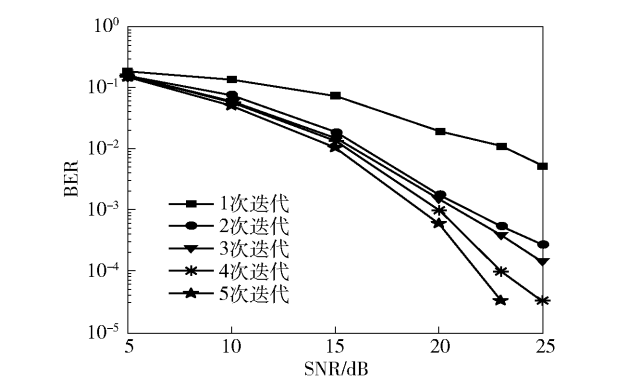


图 6 PDMA 仿真结果

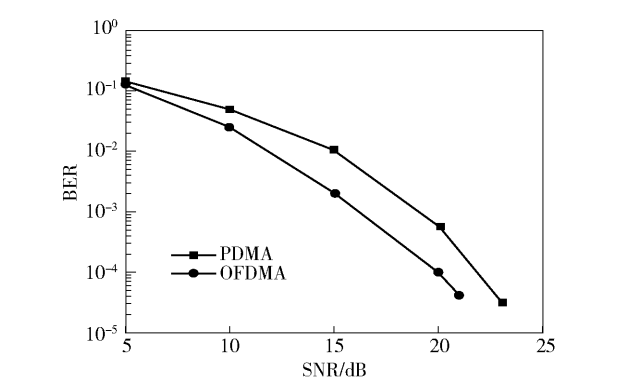


图 7 仿真结果对比

率性能实验结果,其中 BER 为所有用户的平均值. 由图可知,当误码率为  $10^{-3}$  时,通信距离可达 120 cm. 与 OFDMA 方案相比, PDMA 每一组发送数据的用户数为 6, 资源数为 4, 能提供 150% 的过载增益, 因此, PDMA-VLC 系统可以支持更多的用户.

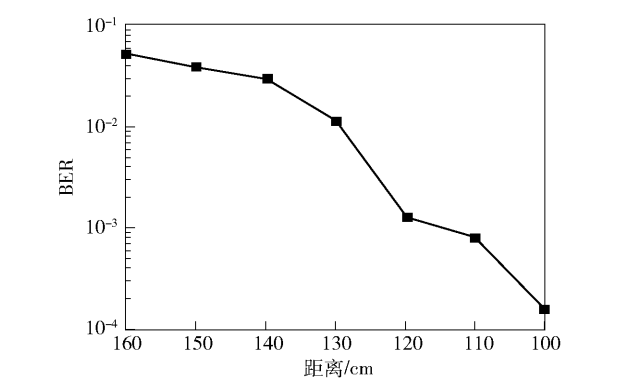


图 8 PDMA-VLC 不同距离下的误码率性能

## 4 结束语

通过介绍 PDMA 技术的基本原理、PDMA-VLC 的工作原理以及实验设置,验证了 PDMA 技术应用于 VLC 的可行性. 对 PDMA 技术进行仿真,分析了

不同信噪比下的误码率,并对 PDMA 和 OFDMA 技术进行了对比,结果表明,提高一定的信噪比,PDMA 技术可达到与 OFDMA 技术相同 BER 性能的同时,能够提供 150% 的过载增益. 对 PDMA-VLC 系统进行实验的结果表明,当误码率达到  $10^{-3}$ ,通信距离可达 120 cm. 因此,在 LED 带宽有限的情况下,PDMA-VLC 是一种提高频谱效率的有效技术.

## 参考文献:

- [1] 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): 7-18.  
Chi Nan, Lu Xingyu, Wang Can, et al. High-speed visible light communication base on LED[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 7-18.
- [2] Lin B, Tang X, Zhou Z, et al. Experimental demonstration of SCMA for visible light communications[J]. Optics Communications, 2018, 419: 36-40.
- [3] Lin B, Tang X, Ghassemlooy Z, et al. Efficient frequency-domain channel equalisation methods for OFDM visible light communications[J]. IET Communications, 2017, 11(1): 25-29.
- [4] Chen S, Ren B, Gao Q, et al. Pattern division multiple access-a novel nonorthogonal multiple access for fifth-generation radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 3185-3196.
- [5] 康绍莉, 戴晓明, 任斌. 面向 5G 的 PDMA 图样分割多址接入技术[J]. 电信网技术, 2015(5): 43-47.  
Kang Shaoli, Dai Xiaoming, Ren Bin. Pattern division multiple access (PDMA) for 5G[J]. Telecommunications Network Technology, 2015(5): 43-47.
- [6] 何明泰. PDMA 图样分割多址技术在下一代移动通信中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [7] 任斌. 面向 5G 的图样分割非正交多址接入(PDMA)关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
- [8] Wang B, Wang K, Lu Z, et al. Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G[C] // IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems & Broadcasting. Ghent, Belgium: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [9] Lou S, Gong C, Gao Q, et al. SCMA with low complexity symmetric codebook design for visible light communication[C] // 2018 IEEE International Conference on Communications. Kansas City: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [10] 郑建宏, 李玉菱, 田枚. 基于加权消息传递的 SCMA 多用户检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(4): 928-932.  
Zheng Jianhong, Li Yuling, Tian Mei. Multiuser signal detection method for SCMA systems based on weighted message passing[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(4): 928-932.