

基于 PWC 编码的 mCAP 可见光通信系统实验

聂云桂, 陈晨*, 简鑫, 付澍, 刘敏

(重庆大学 微电子与通信工程学院, 重庆 400030)

摘要: 针对可见光通信(VLC)系统中发光二极管(LED)有限的调制带宽, 提出了一种多带无载波幅度相位(mCAP)调制与成对编码(PWC)结合的混合方案。该方案中 PWC 技术将高频子带与低频子带进行配对和交织来有效克服信噪比(SNR)不平衡问题。通过实验验证, 给出了在子带数分别为 2、3、4 和 5 的情况下 PWC 编码对应的最佳旋转角度, 并分析了在指定带宽下所能传输的最大调制阶数。实验结果表明: 相比于传统的 mCAP-VLC 系统, 基于 PWC 的 mCAP-VLC 系统可以传输更高调制阶数。

关键词: 可见光通信; 多带无载波幅度相位调制; 成对编码; 发光二极管; 信噪比

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)02-0041-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.02.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

mCAP visible light communication system
experimental based on PWC

NIE Yungui, CHEN Chen*, JIAN Xin, FU Shu, LIU Min

(School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Aiming at the limited modulation bandwidth of light emitting diode (LED) in visible light communication (VLC) system, a hybrid scheme combining multiband carrierless amplitude-phase (mCAP) modulation with pairwise coding (PWC) is proposed. In this scheme, PWC technology pairs and interleaves high-frequency sub-bands with low-frequency sub-bands to effectively overcome the signal to noise ratio (SNR) imbalance problem. Validated by the experiment, the optimal rotation angle corresponding to PWC coding is given when the number of subbands is 2, 3, 4 and 5 respectively, and the maximum modulation order that can be transmitted under the specified bandwidth is analyzed. The experimental results show that compared with the traditional mCAP-VLC system, the mCAP-VLC system based on PWC can transmit higher modulation order.

Key words: visible light communication, multiband carrierless amplitude-phase modulation, paired encoding, light emitting diodes, signal to noise ratio

0 引言

近年来, 基于发光二极管(LED)的可见光通信(VLC)被认为是 6G 和物联网(IoT)系统的关键使能技术之一, 可用于水下通信、室内通信与定位以及智能家居等实际应用场景^[1-2]。与传统射频通信相比, VLC

系统具有频谱资源丰富且使用不受限制、成本低、无电磁干扰和节能环保等固有优势^[3]。然而, 基于 LED 的 VLC 系统面临的挑战之一为有限的可用调制带宽, LED 的频率响应通常呈现典型低通特性, 使得接收端信号低频部分和高频部分信噪比(SNR)不平衡问题突出; 此外, VLC 系统所面临的另一个挑战是 LED 严重的非线性效应^[3]。

研究者们采用了许多技术来解决实际 VLC 系统面临的挑战。为了解决 LED 的带宽限制, 可以通过应用各种模拟或数字均衡技术来有效扩展调制带宽^[4]。此外, 还可以通过利用高频谱效率调制技术来提高系统的速率, 比如采用高阶调制的正交频分复用(OFDM)技术。但是, OFDM 信号峰均功率比较高, 使得 VLC 系

收稿日期: 2021-11-09。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61901065)资助。

作者简介: 聂云桂(1995—), 女, 甘肃武威人, 硕士, 主要研究方向是可见光通信系统中调制解调技术, 目前主要侧重于无载波幅度相位调制和正交频分复用索引调制的工作。

* 通信作者: 陈晨(1988—), 男, 江苏淮安人, 博士, 主要研究方向为 6G 和物联网的智能无线光通信技术。



统更容易遭受非线性失真的影响。与 OFDM 技术相比, 无载波幅度相位调制 (CAP) 技术具有高频谱效率和低峰均功率比的优点, 因此被广泛用于高速 VLC 系统^[9]; 同时, 可以使用多组正交滤波器实现多带 CAP, 即 mCAP。通过增大 mCAP 信号的子带数 m , 可以有效降低各个子带内部的低通影响。然而, 随着子带数的增大, 各个子带之间的低通特性会相应变得明显。因此, 可以在 mCAP-VLC 系统中引入无编码开销且复杂度低的成对编码 (PWC) 技术来抑制子带之间的低通干扰, 从而进一步降低系统误码率 (BER)^[6]。

本文提出一种新的 mCAP-PWC 方案, 通过将 mCAP 调制与 PWC 技术相结合, 有效降低 VLC 系统低通频响对 mCAP 信号的不利影响, 从而提升系统整体 BER 性能。

1 系统原理

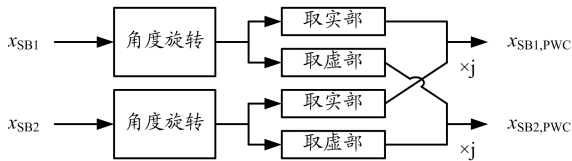
1.1 PWC 技术

PWC 技术的主要思想为通过配对 SNR 不平衡的高频子带与低频子带间的同相和正交 (I/Q) 分量, 从而提升 VLC 系统的整体性能^[7-8]。

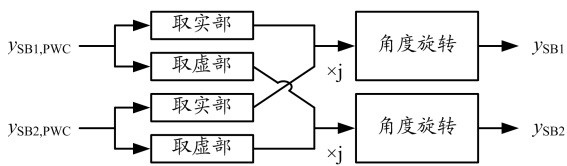
PWC 技术编码和解码示意图如图 1(a) 所示。假设对 2 个子带 SB1 和 SB2 进行 PWC 编码, 子带 SB1 和 SB2 所对应的正交幅度调制 (QAM) 星座符号分别表示为 $x_{SB1} = a_n + jb_n$ 和 $x_{SB2} = c_n + jd_n$, 其中 a_n 和 b_n 分别为子带 SB1 的实部和虚部, c_n 和 d_n 分别为子带 SB2 的实部和虚部。在编码过程中, 先以相同的角度 θ 对 x_{SB1} 和 x_{SB2} 进行旋转, 得到旋转后的星座符号如下:

$$x_{SB1,\theta} = x_{SB1} e^{j\theta} = (a_n \cos \theta - b_n \sin \theta) + j(a_n \sin \theta + b_n \cos \theta) \quad (1)$$

$$x_{SB2,\theta} = x_{SB2} e^{j\theta} = (c_n \cos \theta - d_n \sin \theta) + j(c_n \sin \theta + d_n \cos \theta) \quad (2)$$



(a) PWC 技术编码



(b) PWC 技术解码

图 1 PWC 技术编码和解码示意图

然后, 分别取出每个旋转后星座符号的实部和虚部, 并进入实部和虚部的交织处理, 交织后每个子带的传输信号可以表示为

$$x_{SB1,PWC} = \text{Re}(x_{SB1,\theta}) + j \times \text{Re}(x_{SB2,\theta}) \\ = (a_n \cos \theta - b_n \sin \theta) + j(c_n \cos \theta - d_n \sin \theta) \quad (3)$$

$$x_{SB2,PWC} = \text{Im}(x_{SB1,\theta}) + j \times \text{Im}(x_{SB2,\theta}) = \\ = (a_n \sin \theta + b_n \cos \theta) + j(c_n \sin \theta + d_n \cos \theta) \quad (4)$$

其中, $\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$ 分别表示取实部和取虚部运算。

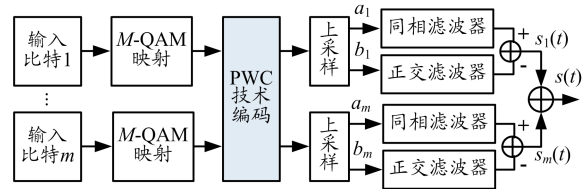
PWC 技术解码示意图如图 1(b) 所示, 首先对接收到的子带信号进行 I/Q 分量解交织, 得到正确的原始旋转信号, 然后对得到的信号进行与发射端相同角度的旋转后得到 QAM 符号, 最后通过 QAM 解映射, 恢复出原始信号。

1.2 系统结构

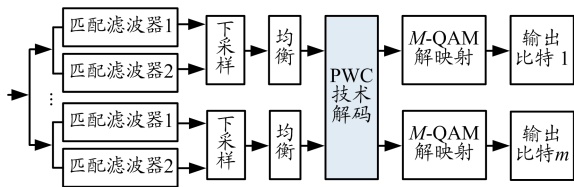
mCAP-PWC 发射端和接收端原理图如图 2 所示。在 mCAP-PWC 发射端, m 个独立的输入比特序列经过 M -QAM 映射后, 对同一时刻的 m 个 M -QAM 符号进行 PWC, 其中 M 为 QAM 星座阶数。然后独立进行上采样, 再将复数信号的实部和虚部分别通过同相滤波器和正交滤波器。其中, 第 n 个子带的同相滤波器和正交滤波器的冲激响应^[10]可分别表示为: $h_n(t) = g(t) \cos(2\pi f_{c,n}t)$ 和 $\bar{h}_n(t) = g(t) \sin(2\pi f_{c,n}t)$, 其中 $n=1, 2, \dots, m$, $g(t)$ 为基带整形滤波器波形, $f_{c,n}$ 为第 n 个子带的整形滤波器的中心频率。最后, 将得到的 2 路输出信号相减, 再将所有独立的 m 路信号相加即可产生

mCAP-PWC 信号, 可表示为 $s(t) = \sum_{n=1}^{n=m} [a_n \otimes h_n - b_n \otimes \bar{h}_n]$ 。

在 mCAP-PWC 接收端, 接收到的信号通过 m 路匹配滤波器 1 和匹配滤波器 2 来对每个子带进行解



(a) mCAP-PWC 发射端



(b) mCAP-PWC 接收端

图 2 mCAP-PWC 发射端和接收端原理图

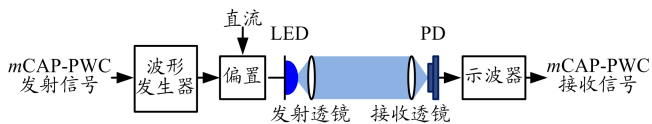
调,接着通过下采样和均衡后,对得到的 m 路信号进行 PWC 解码,就可以得到与发射端对应的 M -QAM 符号,最后通过 M -QAM 解映射就可以得到对应的 m 个输出比特序列。

2 实验装置与结果分析

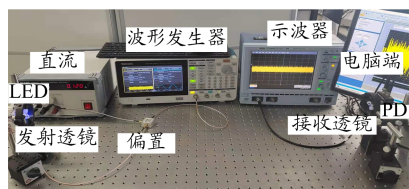
在实验过程中,本文考虑子带数分别为 2、3、4 和 5 的 mCAP 信号,首先确定了 PWC 技术编码所对应的最佳旋转角度,然后研究了不同信号带宽和调制阶数下的 mCAP-VLC 系统的 BER 性能。

2.1 实验装置

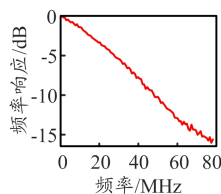
本文搭建点对点 VLC 实验系统如图 3(a)所示。在发射端,由 Matlab 离线生成的 mCAP-PWC 发射信号加载到波形发生器 (Tektronix AFG31102),采样率为 125 MSa/s 和 200 MSa/s,分别对应的信号带宽为 48 MHz 和 76 MHz。接着,波形发生器输出交流信号和 120 mA 直流偏置电流通过偏置器 (ZFBT-6GW+) 合并来驱动蓝光 LED (HCCL52021CHI03)。在接收端,光信号由一个带宽为 150 MHz、有效面积为 0.8 mm^2 的光电探测器 (PD, Thorlabs PDA10A2) 检测。接收到的电信号由示波器 (LeCroy WaveSurfer 432) 记录,采样率为 2 GSa/s,并在 Matlab 中离线解调。此外,还使用一对直径为 12.7 mm、焦距为 20 mm 的双凸透镜来对准 LED 和 PD。实验平台照片和所测系统频率响应分别如图 3(b)和图 3(c)所示。可以看出,在直流偏置电流为 120 mA 时,所测系统频率响应呈现了典型的低通特性,其所对应 -3 dB 带宽为 18 MHz。



(a) 点对点 VLC 实验系统示意图



(b) 实验平台照片



(c) 所测系统频率响应

图 3 点对点 VLC 实验系统图

相应地,在带宽为 76 MHz,子带数分别为 2、3、4 和 5 时所对应的频谱图如图 4 所示。可以看出,低频子带具有相对较高的功率,而高频子带遭受严重的功率衰减,充分体现了该系统存在的如图 3(c)所描述的低通效应。

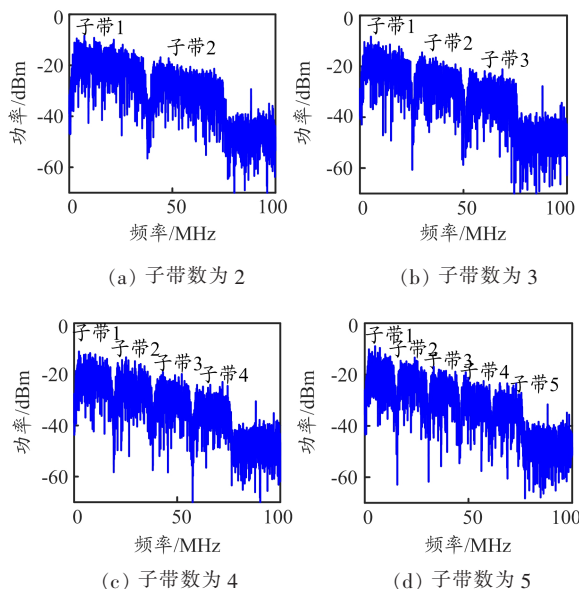


图 4 带宽为 76 MHz 时,子带数分别为 2、3、4 和 5 时所对应的频谱图

2.2 结果分析

在 mCAP-VLC 系统中,低频子带的 SNR 明显高于高频子带,存在不同频率子带 SNR 不平衡的问题。因此,本实验将 PWC 技术编码引入到 mCAP-VLC 系统中,通过将低频子带和高频子带进行配对来平衡整体 SNR。

首先,本文考虑不同子带数、信号带宽以及调制阶数,研究误码率 (BER) 与 PWC 技术编码旋转角度的关系,如图 5 所示。可以看出,在旋转角度由 15° 增大到 75° 的过程中,4 种不同方案的 BER 变化趋势都是随着旋转角度的增大先下降再上升,而且最佳旋转角度均为 45° ,对应的 BER 达到最低,分别为 8.4×10^{-4} 、 1.5×10^{-3} 、 1.6×10^{-3} 和 1.6×10^{-3} 。因此,在后续的实验过程中,PWC 技术编码的旋转角度固定为 45° 。此时,有无 PWC 系统的星座图和 BER 性能比较图如图 6 所示。

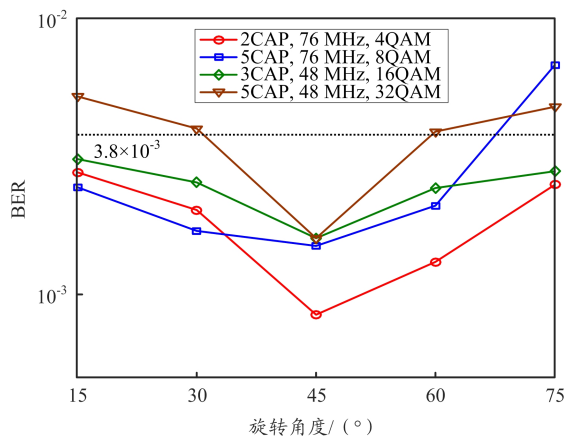


图 5 BER 与旋转角度的关系

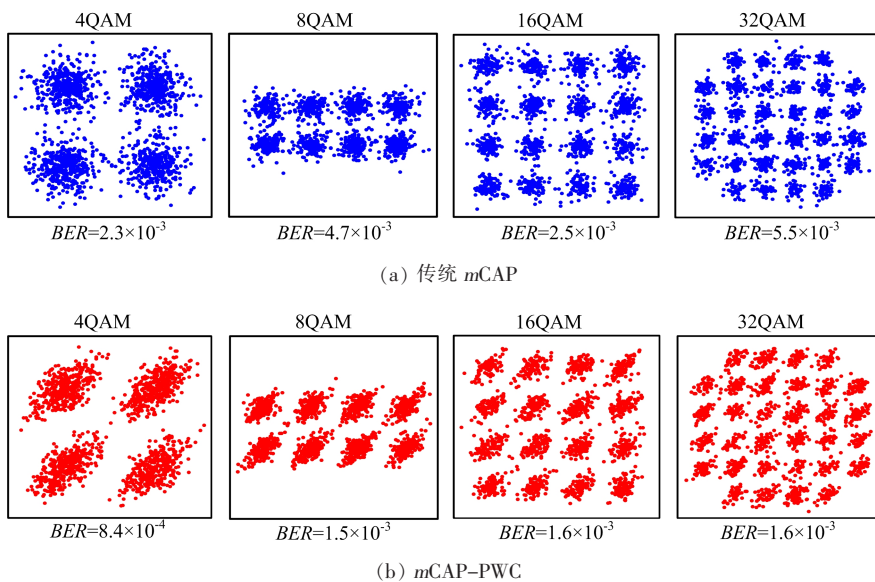


图6 有无 PWC 系统的星座图和 BER 比较图

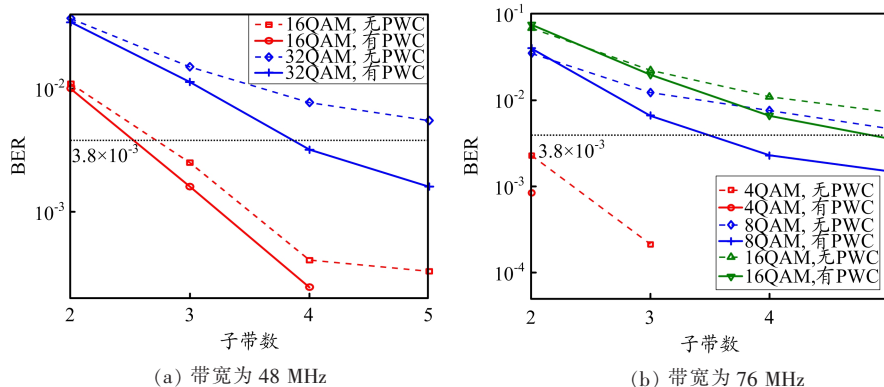


图7 BER 与子带数的关系

可以看出, 与传统的 *mCAP* 系统相比, *mCAP-PWC* 系统中星座点更为收敛, 星座点越收敛, BER 性能越好。因此, 本文所提出的 *mCAP-PWC* 方案能够极大改善系统的 BER 性能。

然后, 本文在不同信号带宽、调制阶数以及有无 PWC 情况下, 研究 BER 与子带数之间的关系, 结果如图 7 所示。当信号带宽为 48 MHz 时, 所有方案的 BER 均随着子带数的增加而呈现下降趋势。具体而言, 当传统的 *mCAP-VLC* 系统可传输的最大调制阶数为 16 时, 其对应的最小子带数为 3; 而在加入 PWC 之后, 32QAM 符号可以在该系统中传输, 其对应的最小子带数为 4。由于当 BER 在 3.8×10^{-3} 以下才能有效传输, 因此当信号带宽为 76 MHz 时, 传统 *mCAP-VLC* 系统最多只能传输 4QAM 符号, 而加入 PWC 之后的 *mCAP-VLC* 系统则可以传输 16QAM 符号, 其对应的最小子带数为 5, BER 为 3.6×10^{-3} 。综上所述, 由于 PWC 技术编码能够解决高频子带和低频子带 SNR 不平衡的问

题, 因此基于 PWC 技术编码的 *mCAP-VLC* 系统可以获得相比传统 *mCAP-VLC* 系统更优的 BER 性能。

3 结束语

在带宽受限的 *mCAP-VLC* 系统中, LED 的有限调制带宽会导致子带间 SNR 不平衡, 高频子带的 SNR 会随着子带数的增加而降低, 导致高频子带 BER 性能变差。PWC 技术编码可以减弱高频衰减给系统带来的影响, 且具有无编码开销和低复杂度的优点。本文将 PWC 技术编码技术应用到 *mCAP-VLC* 系统中, 通过对调制后的 *m* 个子带进行 PWC 技术编码处理来提高系统性能。实验结果表明: 当带宽分别为 48 MHz 和 76 MHz 时, 相比于传统 *mCAP-VLC*, 本文所提出的 *mCAP-PWC* 方案可以传输更高的调制阶数。因此, *mCAP-PWC* 方案在高速带宽受限的 VLC 系统中有着较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 蔡亚芬, 胡博然, 郭延东. 6G 展望: 愿景需求、应用场景及关键技术[J]. 数字通信世界, 2020(9): 53-55.
- [2] CHEN C, FU S, JIAN X, et al. NOMA for energy-efficient LiFi-enabled bidirectional IoT communication[J]. IEEE Trans, 2021, 69: 1693-1706.
- [3] 迟楠, 陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 6-17.
- [4] CHEN C, NIE Y G, LIN M, et al. Digital pre-equalization for OFDM-based VLC systems: centralized or distributed [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33: 1081-1084.
- [5] HAIGH P A, ZVANOVEC G, CHVOJKA P, et al. Multi-band carrier-less amplitude and phase modulation for bandlimited visible light communications systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22: 46-53.
- [6] HE J, HE J, SHI J. An enhanced adaptive scheme with pairwise coding for OFDM-VLC system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30: 1254-1257.
- [7] SHI J, HE J, HONG Y, et al. Performance-enhanced NOMA-VLC using subcarrier pairwise coding [J]. Optics Communications, 2019, 450: 141-146.
- [8] OLANREWAJU. HAMMED G, THOMPSON J, et al. Pairwise coding for MIMO-OFDM visible light communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19: 1210-1220.