

doi: 10.3788/gzxb20154411.1106002

室内可见光 OFDM 通信系统调光控制技术

王旭东¹, 徐宪莹², 吴楠¹, 冯海燕¹

(1 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

(2 大连科技学院 电气工程系, 辽宁 大连 116052)

摘要: 针对室内可见光通信高速率传输和照明控制的问题, 分析了采用脉冲宽度调制调光控制技术的可见光正交频分复用技术系统的调光性能与误码性能. 提出了基于功耗小、性能好的单极性正交频分复用系统的调光控制方案, 对单极性正交频分复用系统的驱动电流和误码率特性进行了仿真, 仿真结果表明, 单极性正交频分复用系统可在不牺牲照明质量的同时改善系统性能. 此外, 针对室内低照明、低功耗的应用需求, 提出了一种功率更加有效的补零非对称削波正交频分复用系统, 仿真分析表明, 补零非对称削波正交频分复用系统可在不损失误码性能的情况下提高系统的功率效率.

关键词: 可见光通信; 调光控制; 光正交频分复用技术; 脉冲宽度调制; 调光范围; 单极化正交频分复用技术; 照明

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)11-1106002-7

Dimming Control Technique for OFDM Based Indoor Visible Light Communication System

WANG Xu-dong¹, XU Xian-ying², WU Nan¹, FENG Hai-yan¹

(1 *Information Science Technology College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China*)

(2 *Department of Electrical Engineering, Dalian Institute Of Science and Technology, Dalian, Liaoning 116052, China*)

Abstract: Focused on two functions of illumination and high rate transmission provided by indoor visible light communication systems, the performance of dimming control with pulse width modulation and bit error rate for Orthogonal Frequency Division Multiplexing based visible light communication was analyzed. A new dimming control scheme based on unipolar orthogonal frequency division multiplexing was proposed due to better performance in terms of both power efficiency and bit error rate achieved by unipolar orthogonal frequency division multiplexing. The dynamic-range of drive current and bit error rate performance were simulated, and the results show that unipolar orthogonal frequency division multiplexing system can obtain better error performance in the mean time without sacrificing illumination quality. In addition, a novel system scheme named zero-padding asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing is presented, which is more efficient in power for the demand of weak lighting intensity and low power consumption. Simulation results show that zero-padding asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing system can improve the power efficiency of the system without loss of error performance.

Key words: Visible light communication; Dimming control; Optical orthogonal frequency division multiplexing; Pulse width modulation; Dimming range; Unipolar orthogonal frequency division multiplexing; Illumination

OCIS Codes: 060.0060; 070.0070; 150.2950

0 引言

随着固态照明技术的迅速发展, LED 以其能源效

率高、产品寿命长、低成本、颜色多样性和环境保护等多方面优势大规模取代传统的白炽灯和节能灯来提供照明^[1]. 在基于 LED 的照明和显示系统已经广泛融入

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61371091) 资助

第一作者: 王旭东 (1967-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为 MIMO 无线通信、光无线通信. Email: wxd@dlmu.edu.cn

通讯作者: 冯海燕 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为可见光通信及定位. Email: fenghaiyan@dlmu.edu.cn

收稿日期: 2015-06-05; 录用日期: 2015-09-08

<http://www.photon.ac.cn>

现代人生活的同时,基于白光 LED^[2]的可见光通信(Visible Light Communications, VLC)技术也获得了深入地研究^[3-4].作为一种新兴的无线通信方式,VLC在电磁辐射、使用环境、安全性等方面与射频无线通信相比具有明显的优势,无处不在的LED设施和其与生俱来的可见光频谱资源让VLC系统成为室内高速数据传输极具吸引力和竞争力的解决方案^[5-6].

最适合VLC系统的调制解调方式是低成本、易实现的强度调制/直接检测(Intensity Modulation/ Direct Detection, IM/DD)技术. IM/DD实现的是光强度调制而非非射频系统中信号的幅度、频率或相位等调制,所以,要求采用IM/DD的VLC系统中的电信号必须是“正、实值”.为了满足室内VLC高速数据传输的需求,正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)^[7]技术被引入到VLC中,以此来提供较高传输速率,且有效对抗光无线信道的码间串扰(ISI)和LED非线性频率响应引起的失真^[8-9].同样,需要对光OFDM信号进行单极化处理,即采用直流偏置正交频分复用技术(DC-biased Optical OFDM, DCO-OFDM)^[10-12]、非对称削波正交频分复用技术(Asymmetrically Clipped OFDM, ACO-OFDM)^[10-13]以及单极性正交频分复用技术(Unipolar OFDM, U-OFDM)^[14]等技术实现IM/DD调制解调信号的正实值要求.

对于可见光通信技术的研究,除了面向提高信息传输性能之外,针对VLC系统照明功能的调光控制技术的研究成为了本领域近期研究的热点.调光控制是照明系统实现照明条件调节、符合美学标准、节约能源等绿色照明理念的关键技术.经调光控制的LED产热少、寿命长,利用调光控制技术可以将灯光强度控制在所需范围内并充分考虑LED的动态范围.调光控制技术可以分为模拟调制和数字调制两种方式,即目前应用较广泛的连续电流调节(Continuous Current Reduction, CCR)和脉冲宽度调制(Pulse Width

Modulation, PWM),其中PWM以其低复杂度、线性调节及能对LED线性动态范围充分利用的特性被广泛应用^[15-16].

如何在保证可靠的宽带通信链路的同时满足高质量的照明状态是可见光通信的重要课题.现阶段仅有少量文献对此给出了相关研究成果.文献[17]提出了一种基于ACO-OFDM系统的PWM调光方法,文献[18]提出了一种基于U-OFDM系统的PWM调光方法,给出在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道下系统误码率的仿真结果及系统调光特性曲线.在此基础上,本文针对可见光OFDM系统调光控制技术进行了拓展研究.根据文献[14]可知,发射功率相同时,U-OFDM系统接收信噪比相对于ACO-OFDM系统有所提高,其性能较ACO-OFDM系统有所改善.因此,本文引入U-OFDM系统进行调光控制,在保障良好照明特性的同时获得了最佳的误码性能.针对实际应用场景低照明强度的要求,在ACO-OFDM系统的基础上,提出一种功率更加有效的调光控制方案,通过调节带内脉冲的概率分布,提高了系统的功率效率,并且系统误码性能没有损失,达到节约能源的目的.

1 可见光 OFDM 系统模型

对于采用IM/DD技术的VLC系统而言,光强不可为负值,故无法直接采用双极性信号,因此需要将双极性的OFDM符号转换为只有正极性的信号.通常是在OFDM信号上加一个直流偏置(DCO-OFDM),但这种做法会大大增加传输光信号的平均光功率,导致系统的功率效率下降,对此文献[13]和[14]分别提出了ACO-OFDM和U-OFDM两种有效的方案,用以解决光OFDM信号单极性变换的问题.两种光OFDM系统发端极性变换的原理如图1所示,ACO-OFDM和U-OFDM分别采用消波补零及成对极性编码方法获得单极性信号.

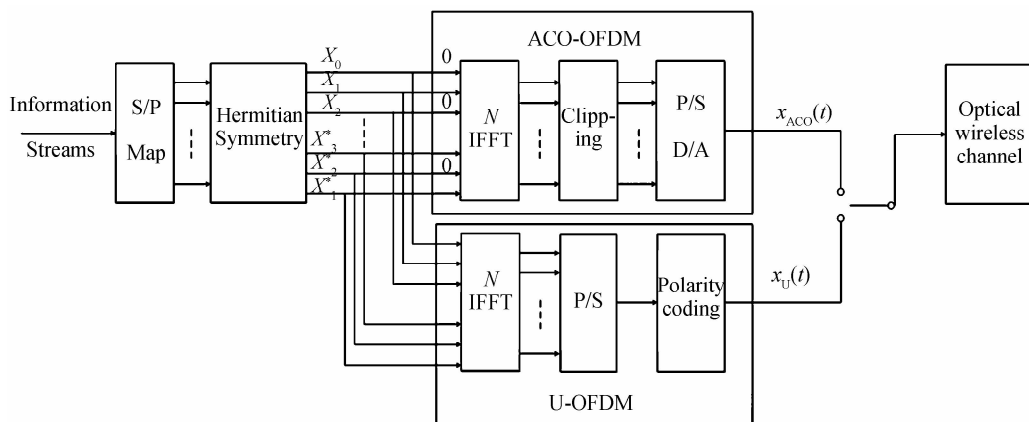


图1 光OFDM系统发端极性变换原理

Fig. 1 Illustration of polarity reversal in Optical-OFDM transmitter

1.1 ACO-OFDM 与 U-OFDM 原理

ACO-OFDM 只在奇载波上传输数据,偶载波上置零,即输入序列应满足 $X = \{0, X_1, 0, X_3, \dots, 0, X_{N/2-1}, 0, X_{N/2+1}, \dots, 0, X_{N-1}\}$ (X_0 和 $X_{N/2}$ 置零)。根据傅里叶变换性质可知,IFFT 输出的时域信号 $x = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_{N-1}\}$ 是具有特殊对称性的双极性 OFDM 符号,即满足 $x_m = -x_{m+N/2}$ 。图 2 给出了 IFFT 计算点数 $N=32$ 的 ACO-OFDM 系统消波前后的时域离散信号波形。由图 2 (a)可以看出,此类双极性 OFDM 信号中负值部分的信息完全可由正值部分反映,因此可在传输过程中将负值部分舍掉(削波),得到符合光通信要求的单极性 ACO-OFDM 信号,如图 2(b)所示,这样处理信号的信息并不丢失,且通过仿真发现由削波产生的噪声仅出现在偶载波上^[10, 13]。

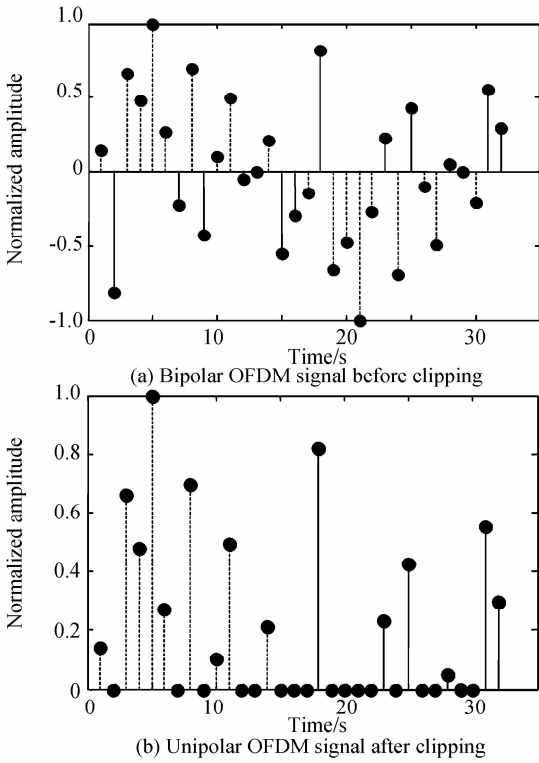


图 2 ACO-OFDM 系统时域信号

Fig. 2 Time domain signal of ACO-OFDM

U-OFDM 的原理是将双极性 OFDM 符号进行编码。编码原则为:将一位数值编码成一对,其中一位保留原数值的绝对值,另一位(“0”)表示符号位,这个“0”在数值位后,则原数值是正数,这个“0”在数值位前,则原数值为负值^[14]。这样编码后的 OFDM 符号所有值均为非负,满足可见光通信的要求,单极化处理前后的信号波形如图 3。

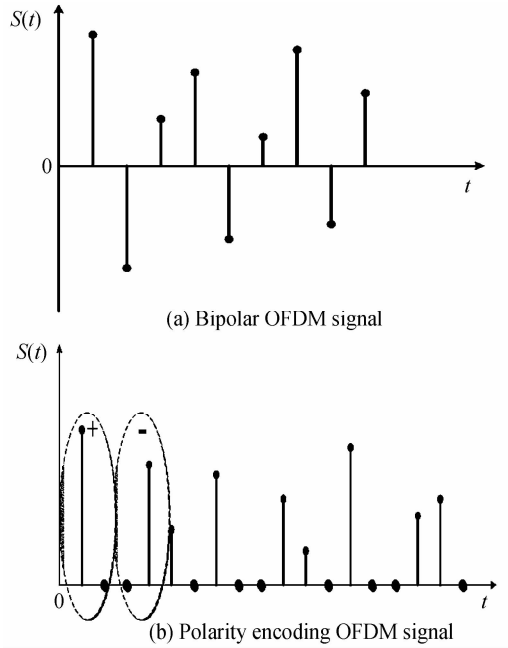


图 3 U-OFDM 系统时域信号

Fig. 3 Time domain signal of U-OFDM

1.2 ACO-OFDM 与 U-OFDM 系统性能比较

考虑 N 路子载波 OFDM 系统,子信道码元持续时间为 T_s ,每路子载波均采用 MQAM 调制,并假设双极性 OFDM 系统频带利用率为 η_{OFDM} 。则 ACO-OFDM 系统和 U-OFDM 系统的频带利用率均为 $\eta_{\text{OFDM}}/4$ 。因此,对于相同调制方式,二者频带利用率相同。

系统功耗可用光信噪比 $E_{b,\text{opt}}/N_0$ 描述,其中 $E_{b,\text{opt}}$ 为每比特光能量, N_0 为加性高斯白噪声(AWGN)单边功率谱密度。图 4 给出了针对 MQAM 不同调制阶数,系统误比特率 BER = 10^{-3} 条件下系统功耗和频带利用率的关系。由图可以看出,相同调制方式下,ACO-OFDM 系统与 U-OFDM 系统的频带利用率相同,而获

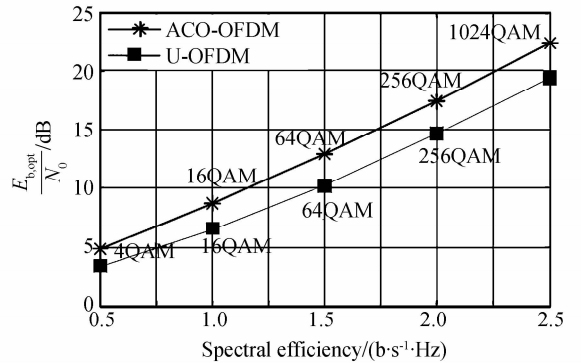


图 4 ACO-OFDM 与 U-OFDM 频带利用率与信噪比的关系

Fig. 4 Relationship of spectral efficiency and SNR for ACO-OFDM and U-OFDM

得相同误码性能时 U-OFDM 系统的功耗要比 ACO-OFDM 系统的小,所以 U-OFDM 系统性能优于 ACO-OFDM 系统.

2 调光控制

LED 因其节省能量、节约成本、寿命长等优势正在逐步取代传统光源,而调光控制在照明应用中是一项重要特征,调光控制技术使得人们可以根据自己对灯光照明强度及节约能量的要求调节室内照明情况.工业上广泛采用两种调光控制技术:一种是通过降低前向电流实现调光的连续电流调节(CCR)调光技术,另一种为通过调节占空比实现调光的脉冲宽度调制(PWM)调光技术. CCR 的优势在于简单、稳定^[16],但一旦确定发射功率,系统的驱动电流值则一定;而 PWM 的优势在于能够在不改变发射功率的情况下,通过调节占空比线性调节光强度,提供较宽的调光范围,且引起的色差较小^[17,19]. 因此本文采用 PWM 调光控制在可见光 OFDM 系统中应用,研究可见光 OFDM 调光控制系统的性能.

2.1 基于 U-OFDM 调光控制原理

文献[20]提出一种基于光 OFDM 系统的 PWM 调光控制技术,仅在 PWM 信号的“导通状态”时间内加载 OFDM 符号,没有对“截止状态”时间段加以利用,这样不仅会降低传输速率,且对 PWM 信号的频率有一定的限制,频率过低会使灯光发生闪烁,对人眼造成伤害.文献[17]提出的调光技术对 PWM 信号的整个周期都加以利用,可以兼顾传输速率和照明强度,并且可以有效消除闪烁,因此本文采用在 PWM 整个信号周期内加载处理,在此基础上,提出了一种新的基于 U-OFDM 系统调光控制方案.

设调光控制 PWM 信号电流其脉冲宽度(导通状态时间)为 T ,信号周期为 T_{PWM} ,应为 U-OFDM 符号长度的整数倍,即 $T_{PWM} = qT_{OFDM}$ ($q = 2, 3, 4, \dots$),占空比 $\tau = T/T_{PWM}$ 为调光控制因子,与调光程度成正比, I_H 和 I_L 分别为 LED 光电转换特性处于线性工作区间时输入电流的上、下限.如图 5 所示,在 PWM 信号“导通状态”期间 T 内将 U-OFDM 信号电流值取反后与 PWM 信号电流相加,在“截止状态”期间内直接将 U-OFDM 信号电流与 PWM 信号电流相加,加载到 LED 上的总驱动电流表达式为

$$i_{LED}(t) = \begin{cases} i_{PWM}(t) - \beta \times i_{OFDM}(t), & 0 \leq t \leq T \\ i_{PWM}(t) + \beta \times i_{OFDM}(t), & T < t \leq T_{PWM} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} I_H - \beta \times i_{OFDM}(t), & 0 \leq t \leq T \\ I_L + \beta \times i_{OFDM}(t), & T < t \leq T_{PWM} \end{cases} \quad (1)$$

经 PWM 调制后的 U-OFDM 信号平均驱动电流为

$$I_{Avg} = \tau(I_H - \frac{\beta}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i_m) + (1 - \tau)(I_L + \frac{\beta}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i_m) \quad (2)$$

式中, β 为 OFDM 符号功率调节系数,可以由所需光强确定 LED 驱动电流大小,从而由式(2)确定 β .图 6 给出了 U-OFDM 符号点数, $N = 64$, $T_{PWM} = 10T_{OFDM}$,占空比 $\tau = 0.3$, $I_H = 1$ A, $I_L = 0$ A 条件下 U-OFDM 符号经 PWM 调制后的驱动电流信号波形.

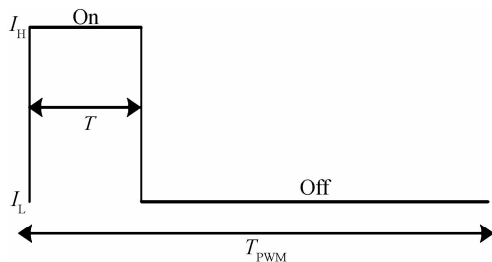


图 5 脉冲宽度调制(PWM)信号
Fig. 5 PWM signal

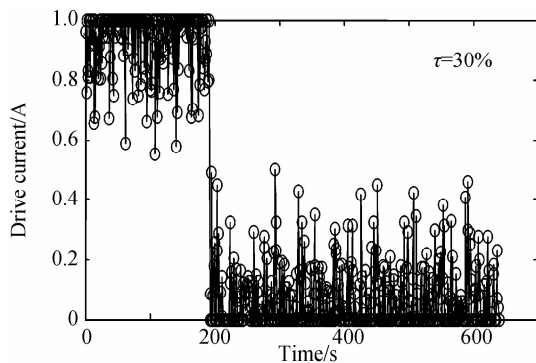
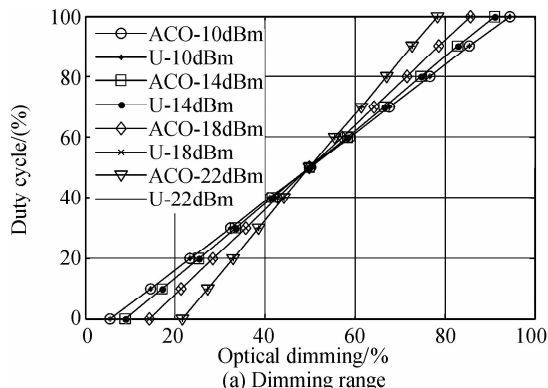


图 6 PWM 调制 U-OFDM 电流信号
Fig. 6 U-OFDM signal current with PWM

2.2 基于 U-OFDM 调光控制系统性能

利用 Matlab 仿真软件,采用 Monte-Carlo 仿真,结合 U-OFDM 调光控制原理,并且与 ACO-OFDM 调光控制系统进行性能比较,可以显示 U-OFDM 系统调光控制的优势.假设发送信号采用 64QAM 调制方式,ACO-OFDM 系统与 U-OFDM 系统符号子载波数为 128,直流偏置大小为 10 dBm,信道噪声为 AWGN,功率为 -3 dBm.

图 7 给出了两种调光控制系统的调光性能及误码性能的比较结果.可以看到,由于基于 PWM 调光控制技术的系统误码性能仅与 OFDM 符号功率有关,所以可以在保持误码性能不变的情况下,即确定一个



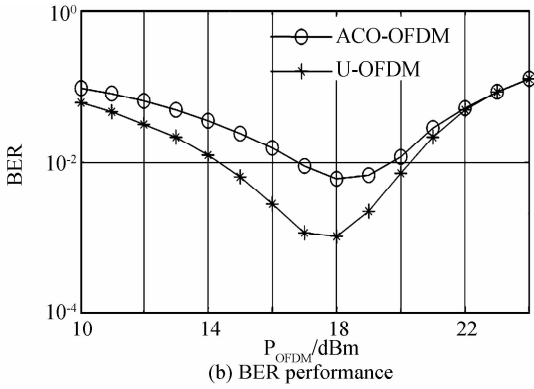


图 7 U-OFDM 和 ACO-OFDM PWM 调光性能对比
Fig. 7 Dimming performance under PWM dimming control in U-OFDM and ACO-OFDM

OFDM 符号的功率时,通过调节占空比而得到很大的调光范围,在这个调光范围内,可根据实际需要对抗光强度进行调节。

仿真实验表明,在 PWM 调光控制下,U-OFDM 系统与 ACO-OFDM 系统的平均电流非常接近,这是因为两种 OFDM 系统在单极化的处理过程中,均损失了一半的能量,规定一个 OFDM 符号的功率后,两种 OFDM 符号所代表的平均电流相同,经相同的调光控制后,两种系统的调光效果相同。对于系统误码性能,考虑对比的两系统其信道噪声和发射信号功率相同的条件下,在接收端,ACO-OFDM 符号功率不变,而 U-OFDM 系统符号经成对检测后去掉符号位“0”,符号功率加倍,导致 U-OFDM 的接收端信噪比增大,因此 U-OFDM 系统的误码性能要好于 ACO-OFDM 系统。上述仿真结果同时也证明了对于设计具有调光控制功能的室内 VLC 高速数据通信系统,基于 U-OFDM 的 PWM 调光控制是一种最佳的解决方法。

2.3 基于补零非对称削波正交频分复用技术的调光控制系统

可见光通信系统设计的关键在于确保稳定可靠传输链路的同时可调节控制灯光,保证合理照明,提高系统的功率效率,达到节约能源的目的。为此本文提出一种新型的光 OFDM 系统——补零非对称削波正交频分复用 (Zero-padding ACO-OFDM, ZACO-OFDM) 系统,可使照明强度在较低范围内,调光深度更深,且可以根据对频带利用率和调光范围的需要,通过调节补位尺度因子大小,达到系统对传输和照明的双重要求。

ZACO-OFDM 系统的思想是在传统的 ACO-OFDM 符号中等间隔地补“0”,这样得到的符号仍然是非负值,符合光通信要求。设 ACO-OFDM 符号点数为 N ,定义一个补位尺度因子 a ,即每隔 a 个点补一位“0”,则 ZACO-OFDM 的符号点数为 $N \cdot (a+1)/a$,ZACO-OFDM 信号电流表达式为

$$i_{ZACO}(k+(n-1)) =$$

$$\begin{cases} i_{ACO}(k), k=na-(a-1), na-(a-2), \dots, na \\ 0, k=na+1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $n=1, 2, \dots, N/a$,所以补位尺度因子 a 应满足使 N/a 为整数。以 $N=32, a=4$ 为例,ZACO-OFDM 符号如图 8(a) 所示。

这种补位的方法可以降低平均驱动电流,同时不会影响误码性能,因为在解调的时候可以按照对应位置将后插入的“0”位完全去掉,同时不会产生额外的噪声,但补位后的符号长度增加,设 ACO-OFDM 符号码元间隔为 T_s ,则 ZACO-OFDM 符号码元间隔为 $(a+1) T_s/a$,系统的频带利用率略有下降,可表示为

$$\eta_{ZACO} = \frac{a}{a+1} \eta_{ACO} = \frac{a}{2(a+1)} \log_2 M(\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}) \quad (4)$$

由式(4)可以看出,随着补位尺度因子 a 增大,ZACO-OFDM 系统的频带利用率将接近 ACO-OFDM 系统。

上述补“0”位的 ZACO-OFDM 符号适合于 PWM 信号的“截止状态”时间段,在“导通状态”时间段加到 PWM 信号上的 OFDM 符号要经过反转,如果仍按照上述补“0”位的方法,反转后加到“导通状态”期间内的“0”就会变为 1,这样会大大增加平均驱动电流,所以,本文在“导通状态”期间内加载的符号要做相应调整,在补位处补“1”,如图 8(b) 所示,这样反转后加到“导通状态”上补“1”位处的电流值为 0。

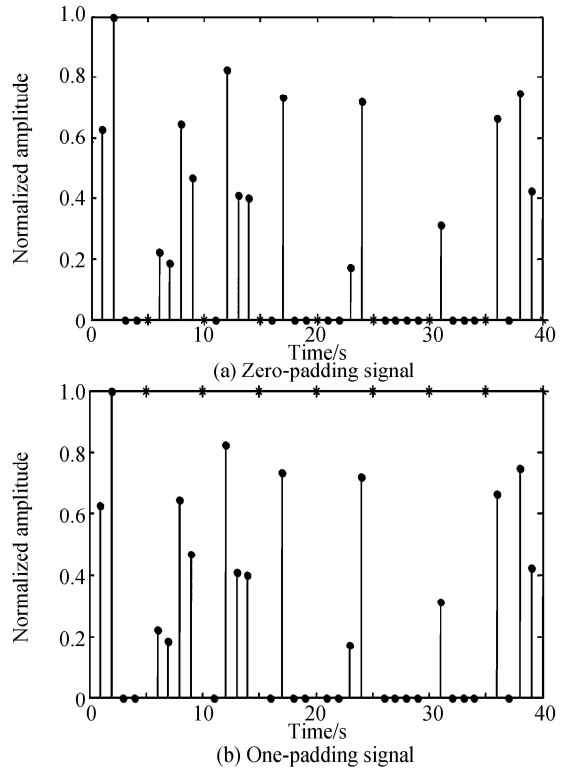


图 8 ZACO-OFDM 符号

Fig. 8 ZACO-OFDM signal

图 9 给出了基于 ZACO-OFDM 系统的系统误码性能和调光控制 LED 驱动电流与 ACO-OFDM 系统的

对比结果.

由仿真结果可以看出,采用 PWM 调光控制时,ZACO-OFDM 系统与传统的 ACO-OFDM 系统相比,两种光 OFDM 系统的误码性能并无明显区别,可以认为误码性能相同.从驱动电流对比图可以看出,ZACO-OFDM 系统的调光控制范围相较于 ACO-OFDM 系统变小,但是,ZACO-OFDM 系统的驱动电流在更低的范围内,可使输出光功率降低,这样,采用 ZACO-OFDM 系统可以在保证不损失可靠性的前提下,提高系统的功率效率;并且可以通过调节补位尺度因子 α ,使通信系统达到实际环境对照明强度的要求.因此,基于 ZACO-OFDM 的调光控制方案更为适合节能绿色照明理念的室内 VLC 高速数据传输.

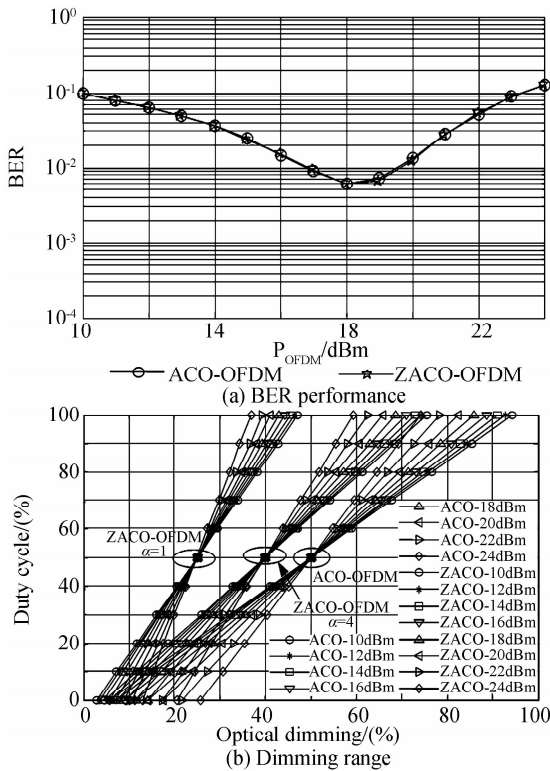


图9 采用 PWM 调光控制的 ZACO-OFDM 与 ACO-OFDM 性能对比

Fig. 9 Drive current under PWM dimming control in ACO-OFDM and ZACO-OFDM

3 结论

针对面向室内 VLC 高速数据传输系统的调光控制功能的实现问题,讨论分析了 PWM 调光控制技术在可见光 OFDM 系统中的应用性能,提出了两种新的光 OFDM 系统的调光控制方法.其中基于 U-OFDM 调光控制方法既提供了最佳的误码性能又保障了良好的照明特性,仿真结果证明了该方法是一种室内高速 VLC 调光控制的最佳解决方案;另一种 ZACO-OFDM 调光控制方案则针对节约能源和符合绿色照明的理念,实现了不损失信息传输可靠性前提下的低功率照

明调节功能.因此该方案在建筑物走廊、楼梯间、会议室及起居室等照明度低的场所具有很好的应用前景.

参考文献

- [1] BARDSLEY N, BLAND S. Solid-state lighting research and development multi-year program plan[EB/OL]. [2015-07-15]. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ss_mypp2014_web.pdf.
- [2] WANG Long-hui, LAN Tian, SHEN Zhen-min, *et al.* Optical receiving antenna for indoor visible light communication based on holographic mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0306004.
王龙辉, 蓝天, 沈振民, 等. 基于全息反射镜的室内可见光通信光学接收天线[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3): 0306004.
- [3] MINH M H. 100-Mb/s NRZ visible light communications using apostequealized white LED [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2009, **21**(15): 1063-1065.
- [4] GRUBOR J, RANDEL S, LANGER K D, *et al.* Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting[J]. *Lightwave Technology*, 2008, **26**(24): 3883-3892.
- [5] RANDEL S, BREYER F, LEE S C J, *et al.* Advanced modulation schemes for short-range optical communications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, **16**(5): 1280-1289.
- [6] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, **49**(9): 56-62.
- [7] HE Zhen, WANG Jian-ping, YAN Jing. A restorable clipping scheme for PAPR reduction of OFDM-ROF system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 0706017.
何振, 王建萍, 颜晶. 降低 OFDM 系统峰均比的可恢复限幅技术[J]. *光子学报*, 2014, **43**(7): 0706017.
- [8] KOMINE T, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Performance evaluation of narrowband OFDM on integrated system of power line communication and visible light wireless communication[C]. *IEEE Symposium on Wireless Pervasive Computing*, 2006: 456-461.
- [9] AFGANI M Z, HAAS H, ELGALA H, *et al.* Visible light communication using OFDM[C]. *2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TRIDENTCOM 2006)*, 2006: 129-134.
- [10] ARMSTRONG J. OFDM for optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(3): 189-204.
- [11] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(7): 1063-1072.
- [12] YOU Xiao-di, CHEN Jian, MA Xin-feng, *et al.* Analysis of time domain reshuffling based on DC-biased optical OFDM [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 0706022.
由骁迪, 陈健, 马新风, 等. 基于 DCO-OFDM 的帧内信号时域调整技术研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(7): 0706022.
- [13] ARMSTRONG J, LOWERY A J. Power efficient optical OFDM [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(6): 370-372.
- [14] TSONEV D, SINANOVIC S, HAAS H. Novel unipolar orthogonal frequency division multiplexing (U-OFDM) for optical wireless [C]. *IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC 2012 Spring)*, 2012: 1-5.
- [15] GANCARZ J, ELGALA H, LITTLE T D C. Impact of lighting requirements on VLC systems [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, **51**(12): 34-41.

- [16] STEFAN I, ELGALA H, HAAS H. Study of dimming and LED nonlinearity for ACO-OFDM based VLC systems[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012: 990-994.
- [17] ELGALA H, LITTLE T D C. Reverse polarity optical-OFDM (RPO-OFDM): dimming compatible OFDM for gigabit VLC links[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(20): 24288-24299.
- [18] XU Xian-ying, WANG Xu-dong, WU Nan. A scheme of U-OFDM based dimming control for indoor visible light communication systems[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, **36**(5): 455-460.
- 徐宪莹, 王旭东, 吴楠. 基于 U-OFDM 的室内可见光通信系统调光控制方法[J]. *半导体光电*, 2015, **36**(5): 455-460.
- [19] GU Y, NARENDRAN N, DONG T, *et al.* Spectral and luminous efficacy change of high-power LEDs under different dimming methods[C]. SPIE, 2006, 6337: 1-7.
- [20] WANG Z, ZHONG W D, YU C, *et al.* Performance of dimming control scheme in visible light communication system [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(17): 18861-18868.