

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

并行翻转-正交频分复用调光控制室内 可见光通信系统

王旭东,冯海燕*,吴楠,徐宪莹
(大连海事大学信息科学技术学院,辽宁大连116026)

摘要:由于室内可见光通信系统不仅需要高速可靠的数据传输链路还需要高质量的照明条件,本文基于脉冲宽度调制(PWM)调光控制技术及其可见光频分复用(OFDM)系统工作原理,对并行翻转(Parallel Flip)-OFDM(PF-OFDM)室内可见光高速通信系统的调光控制进行了研究。介绍了PF-OFDM的原理,验证了其功率效率、频谱利用率、误码性能的良好折中能力。然后将其应用到调光控制中,对其调光性能进行了分析比较。实验结果表明,在16QAM调制下,PF-OFDM室内可见光通信系统的调光控制在达到直流偏置光-OFDM(DCO-OFDM)系统频谱利用率的同时,调光范围略优于该系统,误码性能提高了3 dB。实验结果表明:本文提出的调光控制方法在不牺牲照明质量的同时具有更好的频带利用率和误码性能。

关键词:可见光通信;调光控制;并行翻转正交频分复用(PF-OFDM);调光范围
中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0000

PF-OFDM dimming control for indoor visible light communication systems

WANG Xu-dong, FENG Hai-yan*, WU Nan, XU Xian-ying

(College of Information Science Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

* Corresponding author, E-mail: fenghaiyan@dlnu.edu.cn

Abstract: To achieve reliable high-speed data transmission and high quality lighting for an indoor Visible Light Communication (VLC), a new indoor visible light high-speed communication dimming control scheme was proposed based on a Pulse Width Modulation (PWM) technique and an Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (O-OFDM). First, the working principle of Parallel Flip OFDM (PF-OFDM) was introduced and its good compromise performance in power efficiency, spectral efficiency and bit error rate were verified. Then the dimming performance of PF-OFDM system with the PWM technique was adopted and analyzed. Experimental results indicate that the spectral efficiency of the proposed dimming control scheme approximates the DC-biased optical OFDM (DCO-OFDM) system, the dimming range is slightly better than that of the DCO-OFDM system and the Bit Error Ratio (BER) has improved by 3 dB for 16QAM. Therefore, PF-OFDM dimming control scheme obtains better spectral efficiency and BER performance in the mean time without sacrificing illumination quality.

Key words: Visible Light Communication (VLC); dimming control; Parallel Flip-orthogonal Frequency Division Multiplexing (PF-OFDM); dimming range

收稿日期:2015-05-12;修订日期:2015-06-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61371091)

1 引言

可见光通信 (Visible Light Communication, VLC) 具有频谱资源丰富、能量损耗低、安全性高等优势。室内传输环境下, VLC 是短距离传输及高速接入技术极佳的选择方案, 可与射频通信形成良好的优势互补。随着固态照明技术的迅速发展, 发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 以其能源效率、产品寿命、低成本、颜色多样性和环境保护等多方面优势正大规模地取代传统的白炽灯和节能灯^[1]。目前, 基于 LED 的照明和显示系统已经广泛融入现代人的生活, 同时基于白光 LED 的可见光通信技术也获得了深入地研究。大量的 LED 设施和其可见光频谱资源让 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^[2-3]。2011 年颁布了第一个面向 VLC 的全球通信标准 IEEE 802. 15. 7^[4-5], 这预示着未来 VLC 在无线短距离传输中将扮演愈来愈重要的角色。

为满足室内高速数据传输的需求, VLC 通过采用正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 传输技术来提供较高的传输速率, 并且可以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^[6]。根据 LED 的物理特性, VLC 系统通常采用“强度调制/直接检测” (Intensity Modulation/ Direct Detection, IM/DD) 实现信息传输。这要求加载到 LED 的输入信号必须为“实、正”值, 因此需要对 OFDM 信号做单极化处理。光 OFDM 单极化方法主要有: DCO-OFDM (DC-biased optical OFDM)^[7]、ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical OFDM)^[7-8]、Modified-ACO-OFDM^[9]、Flip-OFDM^[10]、U-OFDM (Unipolar OFDM)^[11] 及 PF-OFDM (Parallel Flip-OFDM)^[12]。其中, PF-OFDM 的功率效率和误码性能优于 DCO-OFDM; 频带利用率则优于 Modified-ACO-OFDM、Flip-OFDM 和 U-OFDM, 因此, PF-OFDM 是室内高速 VLC 系统最为有效的数据传输方案。

IEEE 标准 802. 15. 7 指出, 调光控制是 VLC 通信的一大挑战, 调光控制定义为根据用户需求对照明能源亮度的调节^[13-14]。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 Re-

duction, CCR) 和脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM)^[13, 15]。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而被广泛应用^[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给出了相关的研究成果。文献 [17] 提出了基于 ACO-OFDM 系统的 PWM 调光方法, 给出了在加性高斯白噪声 (AWGN) 信道下系统误码率的仿真结果及系统的调光特性曲线。新近提出的 PF-OFDM 技术在功率效率、频带利用率以及误码性能等方面较现有的光 OFDM 技术显示出了较大优势, 但对其调光控制功能的研究尚未见报道。本文提出了一种基于 PF-OFDM 系统的调光控制方法, 通过引入 PWM 调光控制技术实现了 PF-OFDM 信号的调光控制, 在不牺牲传输速率和误码性能的同时获得了良好的照明质量控制性能。

2 PF-OFDM 系统

2.1 PF-OFDM 原理

为实现高速数据传输和有效对抗码间干扰及频率选择性衰落, 在可见光通信中引入了 OFDM 技术。通常 OFDM 符号是一个双极性信号, 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。最直接的单极化算法是在 OFDM 信号上加一个直流偏置 (DCO-OFDM), 但这种做法大大增加了传输光信号的平均光功率, 导致系统的功率效率下降。翻转 OFDM (Flip-OFDM) 不需要直流偏置, 因此功率利用率要高于 DCO-OFDM, 但是其频带利用率仅是 DCO-OFDM 的一半。PF-OFDM 在 Flip-OFDM 的基础上引入了并行传输的思想, 在保留了 Flip-OFDM 功率利用率优势的同时提高了频带利用率。PF-OFDM 系统发端原理如图 1 所示, 图中 $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为经 QAM 调制后的复向量, $S_{PF}(t)$ 为 PF-OFDM 信号。

PF-OFDM 信号产生原理如图 2 所示。发端独立发送多路二进制比特流, 分别调制成多路 Flip-OFDM 信号, 按特定帧格式排列叠加而成的新信号即为 PF-OFDM 信号。PF-OFDM 信号帧格

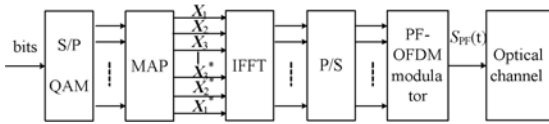


图 1 PF-OFDM 系统发端原理图

Fig. 1 Block diagram of PF-OFDM transmitter

式如图 3 所示。第一路 PF-OFDM 信号与 Flip-OFDM 相同;第二路 PF-OFDM 信号是将原 Flip-OFDM 复制 2 次,再按 2 个“正模块”、2 个“负模块”顺序排列;第三路 PF-OFDM 信号是将原 Flip-OFDM 信号复制 4 次,按 4 个“正模块”、4 个“负模块”顺序排列;以此类推,最后将这多路信息进行叠加形成 PF-OFDM 信号来驱动 LED。

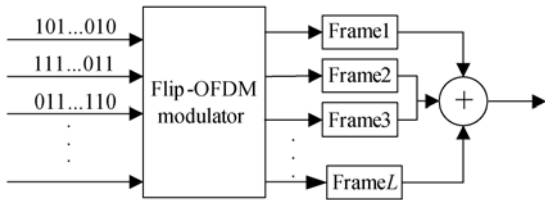


图 2 PF-OFDM 产生框图

Fig. 2 Block diagram of PF-OFDM generation

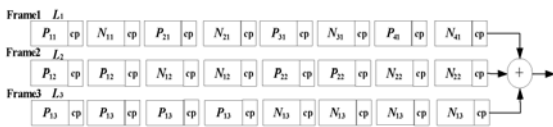


图 3 PF-OFDM 帧格式

Fig. 3 Frame format of PF-OFDM

在图 3 中, P_{ml} 和 N_{ml} 分别表示在调制深度为 l ($l=1, 2, \dots, L$) 时,第 m 个 Flip-OFDM 的正模块和负模块。另外根据能量守恒原则,每路信号的能量 E 保持不变,则第 l 路信号每一帧的能量为 $E/2^{l-1}$,幅值则为原幅值的 $1/\sqrt{2^{l-1}}$ 。

这里以 3 帧信号为例说明 PF-OFDM 信号的接收。帧 1 的解调和 Flip-OFDM 一致。如图 3 所示,将合成信号的第一个时隙中正模块数据 P_{11} 减去负模块数据 N_{11} 便可得到对应第一帧第一个时隙的双极性 OFDM 符号。由于叠加在 P_{11} 、 N_{11} 模块上的数据均为 $P_{12} + P_{13}$ 。因此,由其他帧附加的信息对第一帧的解调没有影响。将解调出的第一帧信息比特流重新调制为 Flip-OFDM 信号,按帧 1 的格式排列。解调帧 2 时,用接收端合成信号信息减去解调出的第一帧 Flip-OFDM 信号,然后将对应帧 2 的同一时隙中的正负模块每 2 个相

加后再正负模块相减,得到第二帧双极性 OFDM 符号。将解调出的第二帧信息比特流重新调制为 Flip-OFDM 信号,按帧 2 的格式排列。解调帧 3 时,用接收端合成信号信息减去解调出的第一、二帧 Flip-OFDM 信号,然后将帧 3 的相同模块每 4 个相加,再正负模块相减便可得到第三帧双极性 OFDM 符号。依此原理,迭代解调出其它各帧信息。

PF-OFDM 的频带利用率与并行传输的路数(调制深度)有关。当并行传输 L 路信号时,PF-OFDM 信号的频带利用率与 Flip-OFDM 的关系为:

$$\eta_{PF}(L) = \sum_{l=1}^L \frac{\eta_{Flip}}{2^{l-1}} = \eta_{Flip} \sum_{l=1}^L \frac{1}{2^{l-1}} \quad (1)$$

当 $L \rightarrow \infty$ 时,PF-OFDM 信号的频带利用率与 Flip-OFDM 及 DCO-OFDM 的关系为:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \eta_{PF}(L) = \eta_{Flip} \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^L \frac{1}{2^{l-1}} = 2\eta_{Flip} = \eta_{DCO} \quad (2)$$

实际中,并行传输路数不需要很多。当 $L=5$ 时, $\eta_{PF} = 0.968\eta_{DCO}$,即二者频带利用率近似相同。

2.2 PF-OFDM 性能分析

在诸多光 OFDM 单极化算法中,DCO-OFDM 的频带利用率最高,而功率利用率却最低。ACO-OFDM 是将双极性的 OFDM 符号负半部分削波,其功率效率较 DCO-OFDM 有所提高,但其误码性能相对于 OFDM 损失了 3 dB; Modified-ACO-OFDM 虽然消除了 3 dB 的差距,但频带利用率却下降为 ACO-OFDM 的一半; Flip-OFDM 性能则与 ACO-OFDM 相同。U-OFDM 误码性能虽优于 Flip-OFDM,但是频带利用率仅为 DCO-OFDM 的一半。本文采用的 PF-OFDM 相较于 DCO-OFDM,其功率效率显著提高,误码性能优于 DCO-OFDM 且不损失频带利用率,其频带利用率优于 ACO-OFDM、Flip-OFDM、Modified-ACO-OFDM 和 U-OFDM。

考虑 N 路子载波 OFDM 系统,子信道码元持续时间为 T_{OFDM} ,每路子载波均采用 M-QAM 调制,并假设双极性 OFDM 系统的频带利用率为 η_{OFDM} ,上述各种 OFDM 单极化算法的性能比较如表 1 所示。图 4 给出了系统误码率 $BER = 10^{-3}$ 时,系统功耗和频带利用率的关系。

表 1 各种光 OFDM 算法性能比较

Tab. 1 Comparison of performance among various optical OFDM systems

光 OFDM	DCO	ACO	Filp	U	MACO	PF(L=5)
频带利用率	$\frac{\eta_{\text{OFDM}}}{2}$	$\frac{\eta_{\text{OFDM}}}{4}$	$\frac{\eta_{\text{OFDM}}}{4}$	$\frac{\eta_{\text{OFDM}}}{4}$	$\frac{\eta_{\text{OFDM}}}{8}$	$\frac{31}{64}\eta_{\text{OFDM}}$
误码率	MACO-OFDM < U-OFDM < ACO-OFDM = Flip-OFDM < PF-OFDM < DCO-OFDM					
功率损耗	DCO-OFDM > U-OFDM = Flip-OFDM = ACO-OFDM = PF-OFDM = MACO-OFDM					

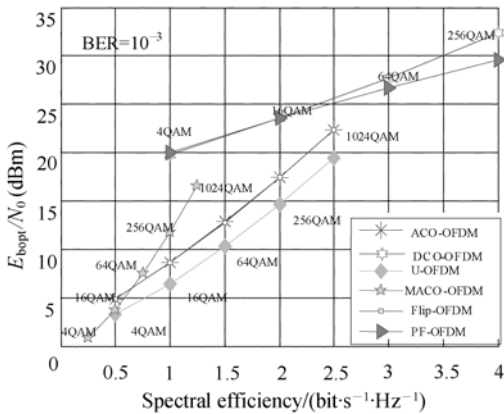


图 4 光 OFDM 系统功耗与频带利用率的关系

Fig. 4 Relationship between power cost and spectral efficiency for O-OFDM

根据上述性能对比可以看出,当系统对有效性要求较高时,应首先考虑频带利用率高的 DCO-OFDM 和 PF-OFDM 算法;而 PF-OFDM 算法在达到 DCO-OFDM 频带利用率的同时,又有比较高的功率利用率以及更优的误码性能。因此,PF-OFDM 算法是一种有效合理的高速传输调光控制系统设计方案。

3 PF-OFDM 调光控制

3.1 调光控制技术

LED 因具有能耗小、成本低、寿命长等优势正在逐步取代传统光源。调光控制是照明应用中一项重要的技术,该技术使得人们可以根据自己对灯光照明强度及能量节约的需求来调节室内照明情况。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 CCR 调光技术;另一种为通过调节占空比实现调光的 PWM 调光技术。CCR 的优势在于简单、稳定,缺点是对于固定的发射功率,系统的驱动电流值固定,因

此调光范围有限;而 PWM 能够在不改变发射功率的情况下,通过调节占空比来线性调节光强度,不仅能提供较宽的调光范围,而且引起的色差较小^[18-19]。因此,本文应用 PWM 调光控制技术来分析可见光 OFDM 调光控制系统的性能。

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,还在一定程度上限制了 PWM 信号的频率,而频率过低会使灯光发生闪烁,对人眼造成伤害。文献[16]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,这里采用了文献[16]给出的 PWM 方案。

PWM 信号电流如图 5 所示,其脉冲宽度(导通状态时间)为 T ,信号周期为 T_{PWM} ,应为 OFDM 符号长度的整数倍,即 $T_{\text{PWM}} = qT_{\text{OFDM}}$ ($q = 2, 3, 4, \dots$);占空比 $\tau = T/T_{\text{PWM}}$ 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限和下限。在 PWM 信号“导通状态”期间 T 内,将 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 OFDM 信号电流与 PWM 信号电流相加,加载到 LED 上的总驱动电流为:

$$i_{\text{LED}}(t) = \begin{cases} i_{\text{PWM}}(t) - \beta \times i_{\text{OFDM}}(t), & 0 \leq t \leq T \\ i_{\text{PWM}}(t) + \beta \times i_{\text{OFDM}}(t), & T < t \leq T_{\text{PWM}} \end{cases} = \begin{cases} I_{\text{H}} - \beta \times i_{\text{OFDM}}(t), & 0 \leq t \leq T \\ I_{\text{L}} + \beta \times i_{\text{OFDM}}(t), & T < t \leq T_{\text{PWM}} \end{cases} \quad (3)$$

经 PWM 调制后 OFDM 信号的平均驱动电流为:

$$I_{\text{Avg}} = \tau(I_{\text{H}} - \frac{\beta}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i_m) + (1 - \tau)(I_{\text{L}} + \frac{\beta}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i_m), \quad (4)$$

其中: β 为 OFDM 符号功率的调节系数。由所需光强确定 LED 的驱动电流,再由式(4)确定 β 。图 6 给出了 OFDM 符号点数 $N = 64$, $T_{\text{PWM}} = 10T_{\text{OFDM}}$, 占空比 $\tau = 0.25$, $I_{\text{H}} = 1 \text{ A}$, $I_{\text{L}} = 0 \text{ A}$, 8QAM 调制条件下,OFDM 信号经 PWM 调制后的驱动电流信号波形。

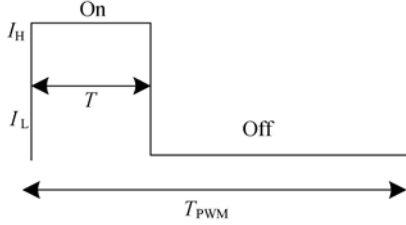


图 5 PWM 信号
Fig. 5 PWM signal

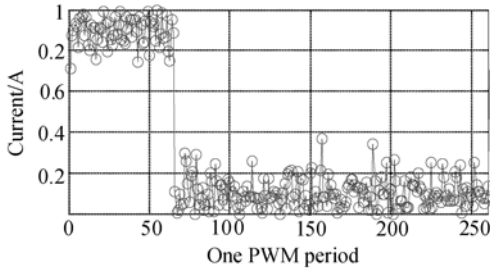


图 6 PWM 调制后 OFDM 电流信号
Fig. 6 PF-OFDM signal current with PWM

3.2 调光控制实现

为了实现数据的高速传输,利用 PF-OFDM 信号频带利用率高的优势,本文采用 PWM 进行 PF-OFDM 系统的调光控制,其原理图如 7 所示。

调光程度的不同确定了极性变换的 PF-OFDM 信号电流和 PWM 信号电流 $i_{\text{PWM}}(t)$ 。再依据发射的光功率确定调光因子,进而用调光因子调节极性变换的 PF-OFDM 信号得到电流 $i_{\text{PF-OFDM}}(t)$ 。LED 的驱动电流 $i_{\text{LED}}(t)$ 由 $i_{\text{PWM}}(t)$ 和 $i_{\text{PF-OFDM}}(t)$ 共同决定。LED 传输的信息经过光信道传输后,由光检测器检测接收。

每个 PF-OFDM 符号的信噪比为:

$$SNR \propto \frac{(\beta * E[i_{\text{PF-OFDM}}(k)])^2}{\sigma_N^2}, \quad (5)$$

其中: β 为 OFDM 符号功率调节系数; $(\beta * E[i_{\text{PF-OFDM}}(k)])^2$ 对应 PF-OFDM 信号的平均电功率 $P_{\text{PF-OFDM}}$; σ_N^2 代表加性高斯白噪声(AWGN)信道的噪声功率,可以表示为散粒噪声

σ_{shot}^2 和热噪声 $\sigma_{\text{thermal}}^2$ 之和,即有:

$$\sigma_N^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2. \quad (6)$$

通过调节 OFDM 符号功率调节系数 β 来改变 PF-OFDM 信号的平均电功率,进而调节信噪比的大小。当 $P_{\text{PF-OFDM}}$ 一定时, $i_{\text{LED}}(t)$ 电流值中超出 LED 动态范围的部分需要进行限幅处理。

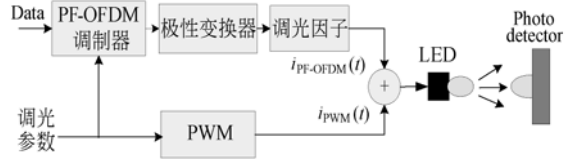


图 7 PF-OFDM 调光控制原理图
Fig. 7 Scheme of PF-OFDM dimming control

4 实验结果分析

本节通过对 PF-OFDM、ACO-OFDM、DCO-OFDM 及 U-OFDM 等调光控制系统进行性能仿真,分析比较了 PF-OFDM 调光控制系统在调光范围、频带利用率及误码性能方面的性能。

4.1 调光范围比较

分别选取 $M = 8, 16, 32$ 和 64 四种 QAM 调制方式,对比 DCO-OFDM 和 PF-OFDM 的调光范围,仿真结果如图 8 所示。可以看出,PF-OFDM 的调光范围略优于 DCO-OFDM,并且调光范围与 QAM 调制的阶数没有关系。当发射信号功率一定时,可以通过调节占空比达到所需的调光范围。在此前提下,采用相同进制 QAM 调制即 16QAM,对比 PF-OFDM、ACO-OFDM、DCO-OFDM、U-OFDM 的调光范围。由图 9 可以看出,U-OFDM 的调光性能与 ACO-OFDM 基本一致,ACO-OFDM 的调光范围在大信号时优于 PF-OFDM,小信号时二者性能接近。综合图 8 的结果可知,DCO-OFDM 的性能最差。

4.2 调光系统误码性能比较

在占空比 $\tau = 0.2$ 时,采用 16QAM、32QAM 的调制方式,OFDM 信号平均发射电功率设定在 $8 \sim 20 \text{ dBm}$, AWGN 信道噪声的平均功率为 -2 dBm 。比较 PF-OFDM、ACO-OFDM、DCO-OFDM、U-OFDM 的误码性能,仿真结果如图 10 所示。

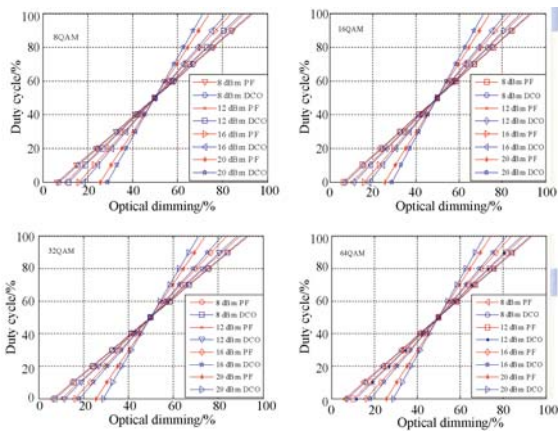


图 8 不同调制方式下的调光范围

Fig. 8 Ranges of optical dimming under various modulation schemes

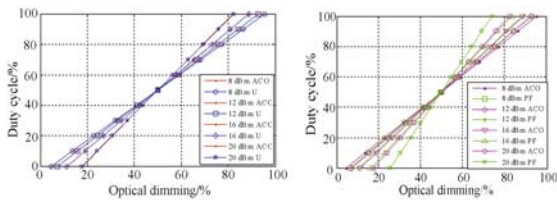


图 9 不同光 OFDM 系统的调光范围

Fig. 9 Ranges of optical dimming of various optical OFDM systems

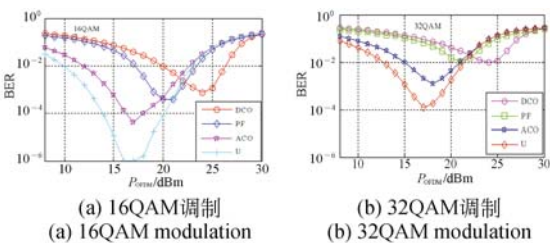


图 10 调光误码性能

Fig. 10 BER performance of dimming

由图 10 可以看出,PF-OFDM 调光的误码性能优于 DCO-OFDM,ACO-OFDM、U-OFDM 调光误码性能优于 PF-OFDM。初始阶段误码性能随发射功率的增加而减小,因为此时信道噪声(AWGN)起主导作用,发射功率增加使得系统的信噪比增加,因此误码性能得到改善;随着发射功率的进一步增加,误码性能则呈现恶化下降趋势,这是因为发射功率超过一定值后,发送电流超过了 LED 光电转换特性的线性区间,超出部分被限幅,由此产生了限幅噪声并占主导地位。

另外,PWM 调光系统的误码性能仅与 OFDM

信号平均功率有关,所以在给定误码性能指标情况下,即确定一个 OFDM 符号的功率时,通过调节占空比可得到很大的调光范围。在这个范围内,可根据实际需要来调节灯光强度。

实验结果表明,对于设计具有调光控制功能的室内 VLC 数据通信系统,当系统对传输速率要求不高时,基于 U-OFDM 的 PWM 调光控制是最好的方案;当系统对传输速度要求较高时,基于 PF-OFDM 的 PWM 调光控制是一种有效的方案。本文提出的基于 PF-OFDM 的 PWM 调光控制方案主要用于解决数据高速传输的问题。

5 结 论

本文提出了一种 PF-OFDM 调光系统实现方法,通过与 ACO-OFDM、DCO-OFDM、U-OFDM 等调光系统的性能对比,验证了所提方法在调光、误码、频带利用率及功率利用率等方面的良好性能。仿真结果表明,PF-OFDM 是一种室内高速 VLC 调光控制的有效解决方案,可以在不牺牲传输速率和误码性能的同时获得良好的照明质量控制性能。

参考文献:

- [1] RANDEL S, BREYER F, LEE S C J, *et al.*. Advanced modulation schemes for short-range optical communications[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2010, 16(5): 1280-1289.
- [2] 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.
- [3] KOMINE T, NAKAGAWA M. Performance evaluation of visible-light wireless communication system using white LED lighting[C]. *The Ninth IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC 04)*, Alexandria, 2004, 1: 258-263.
- [4] IEEE Standard Association. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*[S]. IEEE-SA Standards Board, 2011: 1-309.
- [5] RAJAGOPAL S, ROBERTS R D, LIM S K. IEEE 802.15.7 visible light communication; modulation

- schemes and dimming support[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(3): 72-82.
- [6] ARMSTRONG J. OFDM for optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 189-204.
- [7] 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.
- [8] ARMSTRONG J, LOWERY A J. Power efficient optical OFDM[J]. *Electronics Letters*, 2006, 2(6): 370-372.
- [9] MOHAMED S D, ANDONOVIC I, SHALABY H, *et al.*. Modified asymmetrically-clipped optical orthogonal frequency-division multiplexing system performance [C]. *IEEE Photonics Conference (IPC 2013)*, Bellevue, 2013: 289-290.
- [10] FERNANDO N, HONG Y, VITERBO E. Flip-OFDM for optical wireless communications[C]. *Information Theory Workshop (ITW)*, Paraty, 2011: 5-9.
- [11] 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)*, Yokohama, 2012: 1-5.
- [12] TSONEV D, HAAS H. Avoiding spectral efficiency loss in unipolar OFDM for optical wireless communication[C]. *IEEE International Conference on Communications (ICC 2014)*, Sydney, 2014: 3336-3341.
- [13] GANCARZ J, ELGALA H, LITTLE T D C. Impact of lighting requirements on VLC systems [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(12): 34-41.
- [14] APSE-APSITIS P, AVOTINS A, RIBICKIS L. Wirelessly controlled LED lighting system[C]. *2nd IEEE Energy Conference & Exhibition, Florence*, 2012: 952-956.
- [15] CHOI J H, CHO E, KANG T, *et al.*. Pulse width modulation based signal format for visible light communications [C]. *OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2010)*, Sapporo, 2010: 276-277.
- [16] 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.
- [17] STEFAN I, ELGALA H, HAAS H. Study of dimming and LED nonlinearity for ACO-OFDM based VLC systems[C]. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Paris, 2012: 990-994.
- [18] DYBLE M, NARENDRAN N, BIERMAN A, *et al.*. Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods[J]. *SPIE*, 2005, 5941: 291-299.
- [19] LOO K, LAI Y, TAN S, *et al.*. On the color stability of phosphor-converted white LEDs under DC, PWM, and Bi-Level drive[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(2): 974-984.
- [20] WANG Z, ZHONG W D, YU C, *et al.*. Performance of dimming control scheme in visible light communication system [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(17): 18861-18868.

作者简介:



王旭东(1967-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,1992年、2008年于西安电子科技大学分别获得硕士、博士学位,主要从事 MIMO 无线通信,空间调制、光无线通信等方面的研究。E-mail: wxd@dlmu.edu.cn

通讯作者:



冯海燕(1989-),女,河北霸州人,硕士研究生,主要研究方向为可见光通信及定位。E-mail: fenghaiyan@dlmu.edu.cn