

基于正交频分复用的 LED 非线性信道下的数字预畸变技术

刘晓爽¹, 李建锋^{1*}, 黄治同², 李建科¹, 孙立辉¹

¹河北经贸大学信息技术学院, 河北 石家庄 050061;

²北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 提出一个自适应数字预畸变(DPD)技术,用于消除基于正交频分复用(OFDM)的可见光通信系统中的非线性失真。该自适应 DPD 利用两路反馈信号来消除信道中的非线性失真,并且利用频域预均衡(pre-FDE)来消除 LED 信道中的线性失真。所提技术可以有效提升可见光通信系统的性能。实验结果表明提出的自适应 DPD 方案可以有效消除 OFDM 的带外和带内噪声。

关键词 光通信; 调制; 非线性; 可见光通信; 正交频分复用

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.240601

Digital Pre-Distortion Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Based LED Nonlinear Channel

Liu Xiaoshuang¹, Li Jianfeng^{1*}, Huang Zhitong², Li Jianke¹, Sun Lihui¹

¹College of Information Technology, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;

²State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract An adaptive digital predistortion (DPD) technique is proposed to eliminate the nonlinear distortion in visible light communication systems based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). In particular, the nonlinear distortion in the LED channel is eliminated by using the proposed adaptive DPD technique with two feedback signals, whereas the linear distortion in the LED channel is eliminated by preequalization in the frequency domain. The proposed scheme can effectively improve the performance of visible light communication systems. In particular, the experimental results denote that the proposed adaptive DPD scheme can effectively eliminate the out-of-band and in-band noise of OFDM.

Key words optical communications; modulation; nonlinearity; visible light communications; orthogonal frequency division multiplexing

OCIS codes 060.4510; 060.4080; 230.3670

1 引言

在可见光通信系统中,光源 LED 具有较强的非线性^[1-3]。非线性对正交频分复用(OFDM)信号影响较大,会导致 OFDM 带外和带内都出现非线性噪声^[4]。OFDM 的带内噪声会引起子信道间干扰

(ICI),而带外噪声则会造成邻信道间干扰(ACI)。Elgala 等^[5]提出使用时域预畸变来消除 LED 非线性,但是需要先验得到 LED 非线性曲线。2011 年杨宇等^[6]研究 LED 非线性对可见光通信系统的影响。2013 年 Stepniak 等^[7]将 LED 非线性近似为 Volterra 级数,但是完整的 Volterra 模型复杂度较

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-06-02; 录用日期: 2019-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(61801165)、河北省自然科学基金(F2017207006)、河北省应用基础研究计划(16960314D)、河北经贸大学青年科技基金(2016KYQ02,2016KYQ03)

* E-mail: lijianfeng555@126.com

高。Qian 等^[8]提出使用后均衡来消除 LED 非线性,但是由于采用后均衡,在接收光信号中还是会存在 ACI。2015 年 Zhang 等^[9]展开了谐波分析,阐明了 LED 非线性主要成分为二次谐波和三次谐波。Li 等^[10]提出使用混合时域和频域的均衡方法,虽然此方法可以有效消除非线性噪声,但是无法消除接收光信号的 ACI。2016 年 Zhao 等^[11]基于正交拟合的 LED 非线性模型对脉冲振幅调制(PAM)信号进行时域预畸变。Schuppert 等^[12]使用基于 Volterra 级数的后向均衡技术,但还是无法消除带外非线性噪声。Bao 等^[13]提出使用数字预畸变(DPD)技术来消除 OFDM 系统中的非线性,该方法基于 Volterra 级数,系统的复杂度较高。Berenguer 等^[14]提出使用 Hammerstein 模型来消除偏振复用(PDM-QAM)系统的非线性。Khanna 等^[15]提出只用奇数阶的 Volterra 级数来消除通信系统的非线性。同样,Kottke 等^[16]和 Sadot 等^[17]所提出的 DPD 技术,都是基于 Volterra 级数。基于 Volterra 级数的 DPD 技术的复杂度较高,其中除了包含非线性系数外,还包含线性系数,并且参数量是随着信道时延长度和非线性程度的增加成倍增加。如何降低 DPD 技术的复杂度成为一个挑战,此外在一个具有记忆特性的非线性系统中,如何设计一个自适应反馈机制也是个关键问题。因此,如何设计一个高效的自适应均衡机制来消除具有记忆特性的 OFDM 系统带外和带内非线性噪声,还需要进一步研究。

本文针对可见光通信系统中 LED 非线性,提出使用自适应 DPD 技术来消除 OFDM 系统中的 ICI 和 ACI。对商用白光 LED 进行实验测试,实验结果证明该技术能有效地消除 LED 非线性,可改善 OFDM 系统的性能。

2 DPD 原理和 OFDM 系统

在可见光通信系统中,光源 LED 是一个非线性器件,同时 LED 也具有较高的信道时延特性(信道记忆特性),因此可见光通信系统是一个具有记忆特性的非线性系统。信道时延特性造成的码间干扰(ISI)属于线性失真,而 LED 非线性造成的多次谐波属于非线性失真。一个具有记忆特性的非线性系统可用 Volterra 级数来表示^[10],即

$$y(t) = h_0 + \sum_{\tau=0}^{T-1} h_1(\tau)x(t-\tau) + \sum_{\tau_1=0}^{T-1} \sum_{\tau_2=\tau_1}^{T-1} h_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2) + \dots +$$

$$\sum_{\tau_1=0}^{T-1} \dots \sum_{\tau_p=\tau_{p-1}}^{T-1} h_p(\tau_1, \dots, \tau_p)x(t-\tau_1)\dots x(t-\tau_p), \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为输入时域序列; $y(t)$ 为输出序列; t 为时间序列; h_0 为常数; p 为非线性的最大阶数; $h_i(\tau_1, \dots, \tau_i)$ ($0 \leq i \leq p$)为第 i 阶的 Volterra 系数; T 为 Volterra 的最大时延长度。直接使用 Volterra 级数的复杂度比较高,为简化 Volterra 级数,可以用 Wiener 模型或 Hammerstein 模型。如图 1 所示,可将非线性系统分割成两部分:一部分是线性时不变系统(LTI),它描述 LED 信道的时延性;另一部分是无记忆非线性系统(NL),它描述信道的非线性。因此,信道的线性失真和非线性失真可以分开处理。LTI 引起的线性失真可通过时域或频域的均衡器来消除,那么在 Volterra 级数中只剩下非线性部分为

$$y(t) = h_0 + h_1(0)x(t) + h_2(0,0)x^2(t) + \dots + h_p(0, \dots, 0)x^p(t). \quad (2)$$

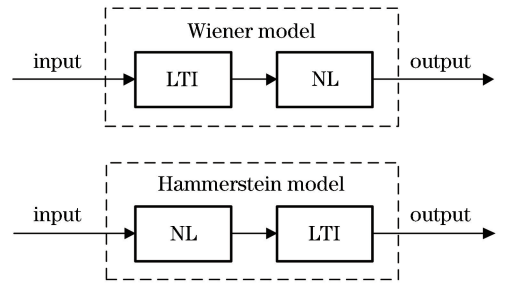


图 1 Wiener 模型和 Hammerstein 模型框图
Fig. 1 Block diagrams of Wiener model and Hammerstein model

OFDM 系统的线性失真很容易在频域通过单抽头均衡器来消除,非线性失真可通过后向时域非线性均衡(Post-NTDE)来消除^[10]。尽管先前所提方法简单有效,然而在光无线信道传输过程中还是会存在带外的非线性噪声,这种带外噪声会引起 ACI。为改善这一问题,本文采用时域 DPD 来消除非线性失真。DPD 技术可在发送端对 LED 非线性进行预补偿,所以经过 LED 发出的光信号不存在 ACI。图 2 为所提出的 OFDM 系统结构。首先,二进制发送数据经过正交幅度调制(QAM),为保证时域为实数信号,QAM 调制后的信号必须满足共轭对称^[18-19];然后采用频域预均衡(pre-FDE)消除信道的记忆特性。这里需要指出的是,与传统的 DPD 不同,本文所提出的 DPD 引入了两路反馈信号:一路为未经 pre-FDE 的时域信号 $\hat{x}(t)$,作

为目标训练序列;另一路为接收信号 $\hat{y}(t)$ 。引入两路反馈信号的原因是,输入时域信号 $x(t)$ 是经过预均衡的,而接收信号 $\hat{y}(t)$ 可近似为无非线性失真的平坦衰落信号,即 DPD 的目标训练序列是没有经过预均衡的平坦衰落信号。因此必须在 pre-FDE 之前,获得目标训练序列。由于可见光通信的时域信号在非线性传输过程中为单极性信号,所以时域信号 $x(t)$ 在输入到 DPD 之前需要增加一个直流分量 d_0 , 表示为

$$\tilde{x}(t) = x + d_0, \quad (3)$$

式中: $\tilde{x}(t)$ 为输入到 DPD 的信号。根据(2)式, DPD 输出的信号为

$$y_{DPD}(t) = \omega_1 \tilde{x}(t) + \omega_2 \tilde{x}^2(t) + \omega_3 \tilde{x}^3(t) + \dots + \omega_L \tilde{x}^L(t) - d_0, \quad (4)$$

式中: ω_L 为第 L 阶非线性抽头系数。抽头系数可通过最小均方算法(LMS)获得,表示为

$$e(t) = \hat{x}(t) - \hat{y}(t) + d_0, \quad (5)$$

$$w(t+1) = w(t) + \mu e(t) \tilde{x}(t), \quad (6)$$

式中: $w(t)$ 为更新的非线性抽头系数; $e(t)$ 为误差函数; $\hat{x}(t)$ 为目标信号序列; $\hat{y}(t)$ 为接收的信号序列; μ 为学习速率。需要指出的是在传输过程中 $\hat{y}(t)$ 包含直流分量,所以在(5)式中要减去直流分量 d_0 。信号经过 DPD 后,再通过数模转换(D/A)、功率放大(PA)和偏置电路(bias-T)后发送给 LED,转换为光信号。在接收端可用雪崩光电二极管(APD)将光信号转换为电信号,通过模数转换(A/D)后,可获得接收信号 $\hat{y}(t)$ 。经过 pre-FDE 和 DPD 的 OFDM 信号在通过 LED 信道后,接收信号 $\hat{y}(t)$ 近似为无非线性失真的平坦衰落信号,然后经过串并变换(S/P)和移除循环前缀(CP)后,即可进行解调。

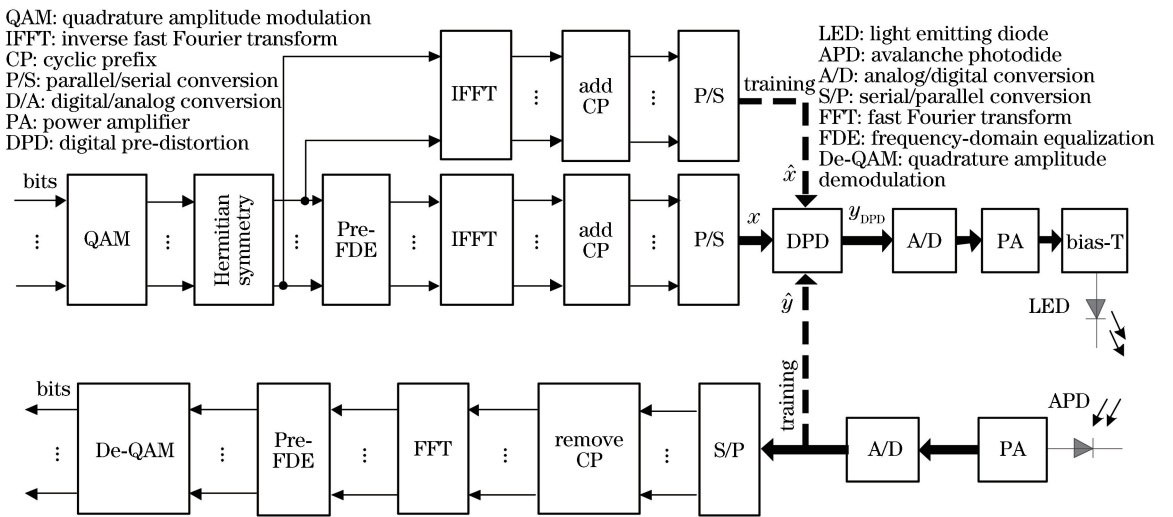


图 2 基于 DPD 的 OFDM 系统框图

Fig. 2 Block diagram of DPD based OFDM system

3 实验装置

本文采用离线实验对 DPD 技术进行研究。如图 3 所示,发送端信号源为一个任意波形发生器(AWG, Tektronix AWG5012),其输出的模拟信号被一个 PA(Mini-Circuits ZHL-6A+)进行信号放大;然后通过偏置电路(bias-T, Mini-Circuits ZFBT-6 GW+)产生单极性信号;最后利用白光 LED(Cree PLCC4)将电信号转换为光信号。在接收端信号经过蓝光滤波(带通 400 ~ 480 nm)后,由 APD(Hamamatsu S8664-20 K)完成光信号检测,APD 的带宽为 280 MHz,最后输入到数字示波器(OSC,

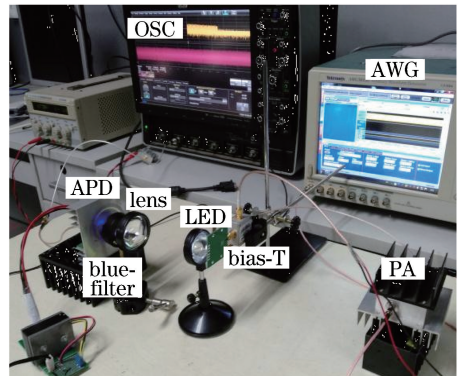


图 3 可见光通信的实验装置

Fig. 3 Experimental setup of visible light communication

LeCroy 735Zi) 中进行解调。本实验传输距离为 25 cm,接收端的最大光照度为 620 lx,LED 的偏置电压为 3.2 V。需要指出的是本实验的通信距离较近,主要原因是本文采用单个 LED 芯片进行了实验研究,其额定功率不足 1 W(约为 700 mW)。在实际的室内应用中,为满足室内照明(300~1500 lx)^[20],需要多个 LED 芯片组成阵列来实现室内照明,关于 LED 阵列的非线性特性还需要进一步研究。

首先对光源 LED 电气特性进行测量。图 4 为 LED 的输入电流和输出光功率的关系,从图中可看出光源 LED 显示出较为明显的非线性。图 5 为实验测量的 LED 信道频率响应特性。本次实验对 OFDM 每个子载波进行二进制相移键控(BPSK)调制,通过接收端检测接收信号的误差向量幅度(EVM)来估计信道的信噪比(SNR)^[10]。从图 5 中可看到 LED 信道近似为指数衰落,说明信道具有较强的记忆特性。为研究 OFDM 在 LED 非线性信道下的性能,参照文献[10],给出偏置系数(B_1)和调制指数(M_1)的定义,分别为

$$B_1 = \frac{I}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (7)$$

$$M_1 = \frac{\Delta I}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (8)$$

式中: I 为偏置电流; ΔI 为 OFDM 电流信号的峰峰值; I_{\max} 为 LED 的最大输入电流; I_{\min} 为 LED 的最小开启电流。

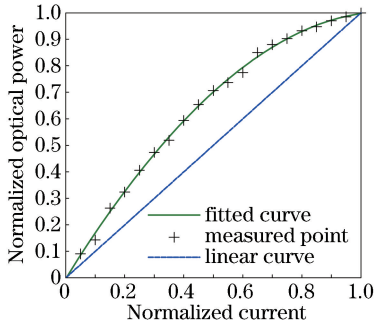


图 4 LED 输入电流与光功率关系

Fig. 4 Relationship between input current and output power for LED

4 结果和分析

在本实验中,DCO-OFDM 系统的调制格式为 64QAM,FFT/IFFT 长度为 1024,CP 长度为 32,子载波数为 200,信号带宽为 195 MHz。AWG 和 OSC 采样率为 1 GHz,发送和接收序列长度为 2000 个 OFDM 符号。图 6 显示实验测得 $B_1=0.3$

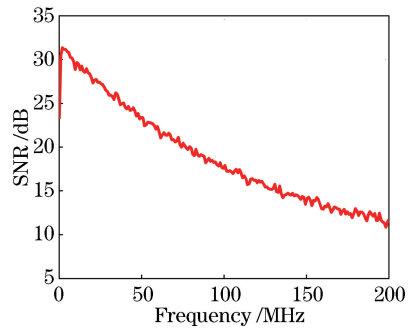


图 5 测量的 LED 信道频率响应特性

Fig. 5 Measured frequency response of LED channel

的 DCO-OFDM 在不同 M_1 下的误码率(BER)性能。当 OFDM 信号未经过 DPD(without DPD)时,随着输入信号功率的增大(M_1 变大),BER 逐渐降低,BER 能降到最低值 7×10^{-3} ($M_1=0.25$),这说明高斯白噪声占据主导地位,随着 M_1 增大,SNR 变大,BER 随之降低。再继续增大输入信号的功率时($M_1>0.25$),BER 性能反而变差,这说明非线性噪声占据主导地位,随着 M_1 增大,非线性噪声变大,BER 随之升高。当 OFDM 信号经过 3 阶 DPD(DPD 3rd)时,系统的 BER 性能得到较为明显的改善。当 $M_1=0.25$ 时,误码率降到了 8×10^{-4} ;继续增大 M_1 时,误码率降到了 6×10^{-5} ($M_1=0.38$)。需要注意的是,当 M_1 大于 0.4 时,输入的 OFDM 信号功率超出了 PA 的工作范围,导致 BER 增高。

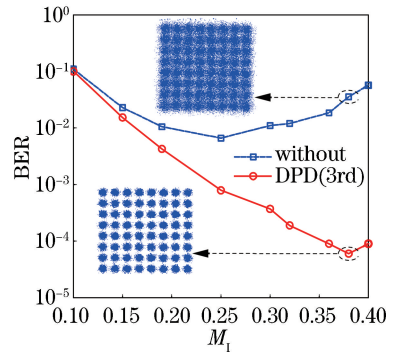


图 6 $B_1=0.3$ 的 DCO-OFDM 在不同 M_1 下的 BER 性能

Fig. 6 BER performance of DCO-OFDM ($B_1=0.3$) with different M_1

图 7 为 OFDM 系统中各部分的信号功率谱密度($B_1=0.3, M_1=0.38$)。图 7(a)为目标训练序列 \hat{x} 的功率谱密度;图 7(b)为经过 pre-FDE 和 DPD 的输出信号 y_{DPD} 的功率谱密度,可以明显看出 LED 非线性在 OFDM 带外也产生非线性噪声;图 7(c)为实验测量得到的接收信号 \hat{y} 的功率谱密度,与文献[10]有较大的不同,可明显看出经过光无线信道传输后,

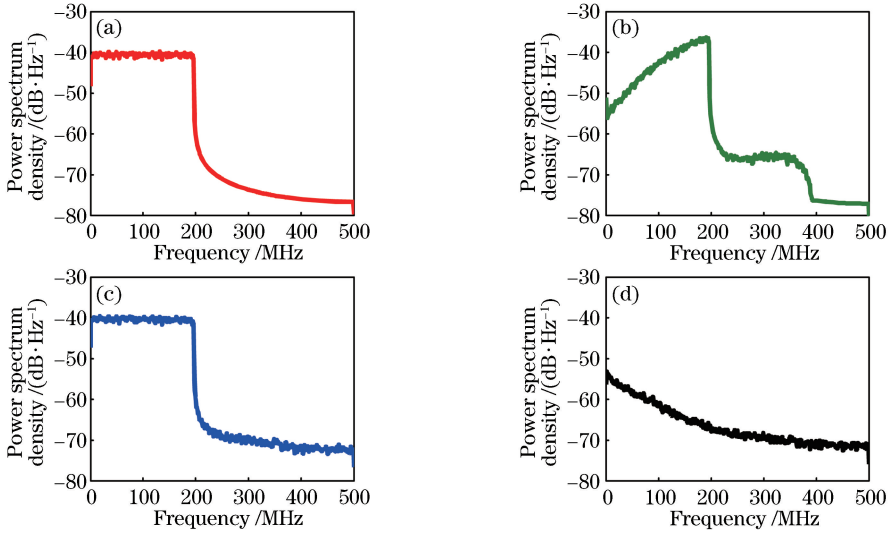


图 7 信号的功率谱密度。(a) \hat{x} 的功率谱密度;(b) y_{DPD} 的功率谱密度;
(c) \hat{y} 的功率谱密度;(d) e 的功率谱密度

Fig. 7 Power spectrum density of signals. (a) Power spectrum density for \hat{x} ; (b) power spectrum density of y_{DPD} ;
(c) power spectrum density of \hat{y} ; (d) power spectrum density of e

接收信号中不存在带外噪声(不会造成 ACI);图 7(d)为误差函数 e 的功率谱密度,可以看到经过 DPD 后,带内和带外的非线性噪声都得到有效抑制。

图 8 为实验得到的时域 OFDM 信号($B_1=0.3$, $M_1=0.38$),实线为经过 DPD 的信号,虚线为未经过 pre-FDE 的目标信号。可以看到经过 DPD 后的信号逐渐靠近目标信号。为分析 DPD 的收敛特性,本文计算了误差函数 e 的均方误差(e_{MS}),如图 9 所示。从图 9 可以看出,在前几个采样点内误差值急速下降,在 500 个点左右(0.5 个 OFDM 信号),误差 e 达到稳定状态。实验证明基于 LMS 的 DPD 具有良好的收敛特性。

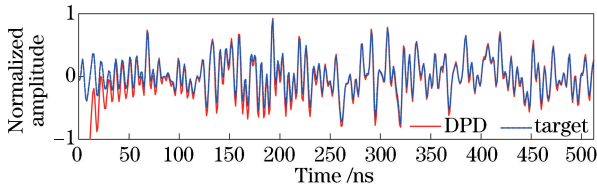


图 8 时域 DCO-OFDM 信号

Fig. 8 DCO-OFDM signal in time domain

5 结 论

设计基于 OFDM 可见光通信系统的自适应 DPD 机制。该机制通过引入两路反馈信号,实现对具有记忆特性的非线性 OFDM 系统信号的非线性补偿。对商用白光 LED 进行实验研究,结果表明使

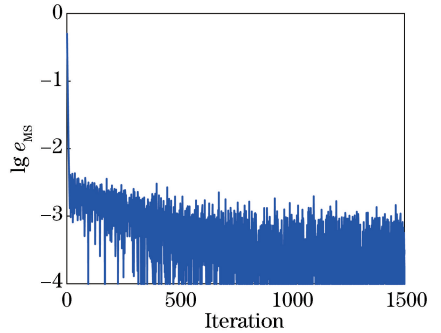


图 9 误差函数的收敛特性

Fig. 9 Convergence characteristic of error function

用本文 DPD 技术可以有效缓解 LED 的非线性,将系统的 BER 从 7×10^{-3} (未经 DPD)降到了 6×10^{-5} (经过 DPD),并且保证在光信道传输过程中不存在 ACI。此外,实验还证明基于 LMS 算法的 DPD 具有良好的收敛特性。可预计本文 DPD 技术能够应用到实际的 OFDM 可见光通信系统中。

参 考 文 献

[1] Neokosmidis I, Kamalakis T, Walewski J W, *et al.* Impact of nonlinear LED transfer function on discrete multitone modulation: analytical approach [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27 (22): 4970-4978.
[2] Inan B, Lee S C J, Randel S, *et al.* Impact of LED nonlinearity on discrete multitone modulation [J].

- Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(5): 439-451.
- [3] Liu X S, Li J F, Li J K, *et al.* Symmetry recovery-based ACO-OFDM performance in LED nonlinear channel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 210603.
刘晓爽, 李建峰, 李建科, 等. LED非线性信道下基于对称恢复的 ACO-OFDM 性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 210603.
- [4] Dardari D, Tralli V, Vaccari A. A theoretical characterization of nonlinear distortion effects in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(10): 1755-1764.
- [5] Elgala H, Mesleh R, Haas H. Non-linearity effects and pre-distortion in optical OFDM wireless transmission using LEDs[J]. International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems, 2009, 1(2): 143-150.
- [6] Yang Y, Zhang J K, Liu B, *et al.* Study of the impact of LED nonlinearity on orthogonal frequency division multiplex based visible light communication systems[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(8): 0805007.
杨宇, 张建昆, 刘博, 等. LED非线性对基于正交频分复用可见光通信系统的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0805007.
- [7] Stepniak G, Siuzdak J, Zwierko P. Compensation of a VLC phosphorescent white LED nonlinearity by means of Volterra DFE [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(16): 1597-1600.
- [8] Qian H, Yao S J, Cai S Z, *et al.* Adaptive postdistortion for nonlinear LEDs in visible light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 7901508.
- [9] Zhang R Q, Li J F, Huang Z T, *et al.* Adaptive frequency domain pre-equalization for white-LED nonlinearity in OFDM-based visible light communication systems[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(7): 072302.
- [10] Li J F, Huang Z T, Liu X S, *et al.* Hybrid time-frequency domain equalization for LED nonlinearity mitigation in OFDM-based VLC systems[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 611-619.
- [11] Zhao W K, Guo Q H, Tong J, *et al.* Orthogonal polynomial-based nonlinearity modeling and mitigation for LED communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(4): 7905312.
- [12] Schuppert M, Bunge C A. 5 Gb/s eye-safe LED-based SI-POF transmission with equalization of transmitter nonlinearities [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(23): 2732-2735.
- [13] Bao Y, Li Z H, Li J P, *et al.* Nonlinearity mitigation for high-speed optical OFDM transmitters using digital pre-distortion[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7354-7361.
- [14] Berenguer P W, Nölle M, Molle L, *et al.* Nonlinear digital pre-distortion of transmitter components[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(8): 1739-1745.
- [15] Khanna G, Spinnler B, Calabrò S, *et al.* A robust adaptive pre-distortion method for optical communication transmitters [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 752-755.
- [16] Kottke C, Caspar C, Jungnickel V, *et al.* High-speed DMT and VCSEL-based MMF transmission using pre-distortion [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 168-174.
- [17] Sadot D, Yoffe Y, Faig H, *et al.* Digital pre-compensation techniques enabling cost-effective high-order modulation formats transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 441-450.
- [18] Song X Q, Wang M Y, Xing S, *et al.* Progress of orthogonal frequency division multiplexing based on visible light communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120008.
宋小庆, 王慕煜, 邢松, 等. 基于可见光通信的正交频分复用技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120008.
- [19] Jia K J, Jin B, Hao L. Performance analysis of optical OFDM adaptive bit-power loading in indoor visible light communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(3): 030603.
贾科军, 靳斌, 郝莉. 室内可见光通信 OFDM 自适应比特功率加载算法性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(3): 030603.
- [20] Liu H L, Zhu P X, Chen Y, *et al.* Optimization of indoor VLC coverage uniformity by improved genetic simulated annealing algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0106001.
刘焕淋, 朱平鑫, 陈勇, 等. 改进遗传模拟退火算法优化室内 VLC 覆盖均匀性[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0106001.