

# LED 记忆非线性自适应预失真技术研究

姚赛杰<sup>1,2</sup> 徐浩煜<sup>3</sup> 汪亮友<sup>3,4</sup> 周 婷<sup>1,2</sup> 钱 骅<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; <sup>2</sup>中国科学院无线传感网与通信重点实验室, 上海 200050)  
<sup>3</sup>中国科学院上海高等研究院, 上海 201210; <sup>4</sup>同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要** 发光二极管(LED)是可见光通信系统(VLC)中最主要的非线性器件,同时由于通带内非平坦的频率响应还伴随着记忆效应。LED的记忆非线性主要恶化了VLC系统的误差矢量幅度(EVM)和比特误码率(BER)。预失真技术通常被用来补偿LED的非线性,从而提高可见光通信系统的性能。现有的预失真技术都不具备自适应性并且没有考虑到LED的记忆效应。提出了一种新的预失真架构,即在发射端增加一路反馈链路来获得LED的输出信号,同时使用记忆多项式模型来自适应地训练并补偿LED的记忆非线性。仿真结果显示提出的预失真技术的BER性能优于现有的方法。

**关键词** 光通信; 可见光通信; 发光二极管; 非线性失真; 记忆效应; 自适应预失真算法

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1105007

## Research of Adaptive Predistortion Technique for Nonlinear LEDs with Memory Effects

Yao Saijie<sup>1,2</sup> Xu Haoyu<sup>3</sup> Wang Liangyou<sup>3,4</sup> Zhou Ting<sup>1,2</sup> Qian Hua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China  
<sup>3</sup>Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China  
<sup>4</sup>School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China

**Abstract** In a visible light communication (VLC) system, the light-emitting diode (LED) is the major source of nonlinearity and exhibits memory effects due to the in-band non-flat frequency response. The LED nonlinearity with memory effects degrades the error vector magnitude (EVM) and bit error rate (BER) in the VLC system. In general, the predistortion technique is mostly utilized to compensate for the LED nonlinearity and thus enhances the performance of the VLC system. However, the existing predistortion techniques cannot work adaptively and neglect the LED memory effects. A new predistortion architecture is proposed by adding a feedback path to obtain the LED output signal and estimating the LED nonlinearity with memory effects by memory polynomial model adaptively. The simulation results show that the proposed technique outperforms the existing methods in terms of BER.

**Key words** optical communications; visible light communications; light-emitting diode; nonlinear distortion; memory effects; adaptive predistortion algorithm

**OCIS codes** 060.2605; 060.4370; 060.4510; 070.4340

## 1 引 言

传统的无线通信系统由于其频谱资源的局限性很难满足日益增长的数据需求。可见光通信

(VLC)系统因其具有免费的频谱、极低的实现成本、较好的保密性能等优点引起了广泛的关注<sup>[1-5]</sup>。发光二极管(LED)是VLC系统中的关键器件,在

收稿日期: 2014-06-03; 收到修改稿日期: 2014-06-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61231009)、上海市科技创新计划(13511503200, 13511503202, 13511507502)

作者简介: 姚赛杰(1988-),男,博士研究生,主要从事可见光通信系统中非线性信号处理等方面的研究。

E-mail: saijie.yao@shrcwc.org

导师简介: 钱 骅(1976-),男,研究员,博士生导师,主要从事无线通信系统物理层算法研究、非线性信号处理、无线传感网等方面的研究。E-mail: hua.qian@shrcwc.org(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

照明的同时还具有传输信号的能力。然而 LED 本身的非线性特性限制了 VLC 系统的性能,具体表现为发射端误差矢量幅度(EVM)的恶化以及接收端比特误码率(BER)性能的下降<sup>[6-7]</sup>。

为了提高 VLC 系统的性能,预失真技术通常被用来补偿 LED 的非线性<sup>[8-9]</sup>。Asatani 等<sup>[8]</sup>设计了一个预失真电路来消除 LED 的非线性,3 阶谐波失真的改善达到了 21 dB。Elgala 等<sup>[9]</sup>使用行为模型对 LED 进行建模,并使用测量到的 LED 的正向电压与电流值进行非线性模型参数估计。这种方法的局限性在于不能实时地跟踪 LED 的非线性变化,如 LED 偏压值不同带来的非线性变化。此外,LED 的频率响应在通带内是不平坦的,意味着 LED 同时还有记忆效应<sup>[10-11]</sup>。文献[9]使用的 LED 非线性模型以及预失真算法均忽略了这一点。

本文提出了一种新的预失真架构,即在发射端增加一路反馈链路来自适应地跟踪并补偿 LED 的记忆非线性效应。反馈链路包括光敏检测器(PD)、带通滤波器、模拟放大电路和数模转换器(ADC)。ADC 的输出信号(失真信号)与原始基带信号被用来估计 LED 的记忆非线性效应,所采用的模型是普遍使用的记忆多项式模型<sup>[12]</sup>。

## 2 问题描述

### 2.1 LED 模型

LED 是 VLC 系统中最主要的非线性器件,是整个系统性能的限制因素。白光 LED(LE UW S2LN-NYPX-5E8G)通常使用于可见光通信系统中,它的非线性主要体现为电压-电流( $V-I$ )转换曲线。本文只考虑 LED 的  $V-I$  转换的非线性,并假设电流-功率( $I-P$ )转换是线性的。从该 LED 的数据手册可以得到 LED 的非线性  $V-I$  曲线如图 1 所示<sup>[13]</sup>。

LED 有一个开关电压,当输入电压小于开关电压时,LED 处于关闭状态不产生光强。如图 1 所示,该 LED 的开关电压值为 2.7 V。同时由于 LED 最大允许电流的限制,LED 输入电压信号的最大值也有一个限定值,该 LED 的最大输入电压为 3.6 V。如图 1 所示,LED 的工作区域为 2.7~3.6 V,其中低电压工作区域呈现出了较强的非线性。

Volterra 模型是描述记忆非线性特性的通用模型,然而由于其结构复杂通常被简化为记忆多项式模型、Wiener 模型以及 Hammerstein 模型等<sup>[14-15]</sup>。本文使用 Wiener 模型来描述 LED 的记忆非线性。

如图 2 所示,Wiener 模型是由一个线性时不变

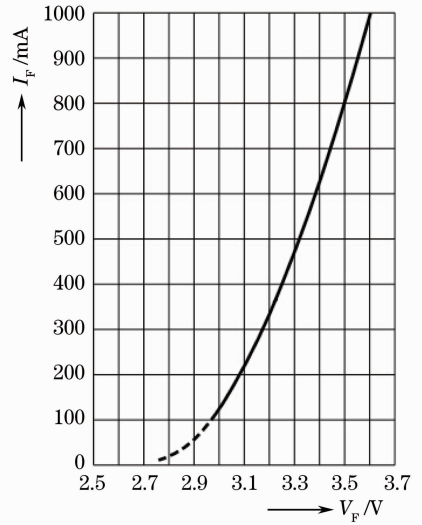


图 1 LED(LE UW S2LN-NYPX-5E8G)的非线性转换特性

Fig. 1 Nonlinear transfer characteristics of the LED (LE UW S2LN-NYPX-5E8G)

(LTI)模块和一个非线性模块(NL)级联组成。非线性模块的传输特性曲线如图 1 所示。

LTI 系统描述如下:

$$r(n) = \sum_{l=0}^{L-1} b_l z(n-l), \quad (1)$$

式中  $z(n)$  为输入信号,  $r(n)$  为输出信号,  $n$  为采样时间,  $l$  为延迟抽头,  $L$  为抽头系数的个数。图 3 是 Wiener 模型的归一化频率响应图,体现出了明显的不平坦性,对应的 LTI 系统参数如表 1 所示。

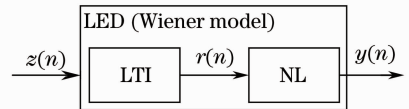


图 2 Wiener 模型结构图

Fig. 2 Block diagrams of a Wiener model

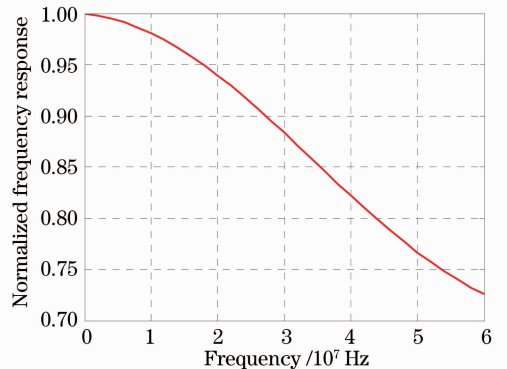


图 3 Wiener LED 模型的归一化频率响应

Fig. 3 Normalized frequency response of a Wiener LED model

表 1 LTI 系统参数

Table 1 Coefficients of the LTI system

$L$	$b_0$	$b_1$	$b_2$
3	1.0	0.3	0.1

## 2.2 直流偏置光正交频分复用 (DCO-OFDM) 信号

在可见光通信系统中,正交频分复用(OFDM)信号因其较高的频谱效率被用来提高系统速率<sup>[16-18]</sup>。同时,OFDM 信号还具有抵抗 LED 记忆效应引入的符号间干扰 (ISI) 的能力。但是由于 LED 只能传输正的实数信号,传统的 OFDM 信号需要进行一些修改来满足这一约束条件,比较常用的有 DCO-OFDM 信号。DCO-OFDM 信号通常具有较高的峰均比(PAPR),此类信号对于系统的非线性比较敏感。

本文中 DCO-OFDM 系统的发射机框图如图 4 中所示。由于只讨论 LED 非线性与记忆效应对 VLC 系统性能的影响,因此仅考虑一个只包含星座图映射、子载波映射和快速傅里叶逆变换 (IFFT) 模块的 DCO-OFDM 系统。如图 4 所示,信息序列首先经过星座映射得到频域信号  $X(k)$ ,然后经过子载波映射和 IFFT 模块后生成时域信号  $x(n)$ 。由于 LED 只支持传输实信号,子载波映射模块将  $X(k)$  映射到正的子载波上面,将复共轭信号  $X^*(k)$  映射

到负的子载波上面。通过这种子载波映射的方式,IFFT 模块的输出信号为实信号,加上直流(DC)偏压后使得输入信号的范围在 LED 的工作范围内<sup>[9]</sup>。

## 3 自适应预失真技术

预失真技术通常被用来补偿可见光系统中 LED 的非线性。Asatani 等<sup>[8]</sup>设计了一个预失真电路来消除 LED 的非线性,3 阶谐波失真的改善达到了 21 dB。Elgala 等<sup>[9]</sup>使用行为模型对 LED 进行建模,并使用测量到的 LED 正向电压与电流值进行参数估计。这种方法的测量和参数估计只能离线完成,不具备自适应性,同时也忽略了 LED 的记忆效应。

本文提出一种自适应预失真技术,能同时自适应地估计并补偿 LED 的非线性特性和记忆效应。

### 3.1 自适应架构

自适应架构如图 4 所示,与传统的 VLC 系统发射机相比,该架构添加了一条反馈链路。该链路包括光敏检测器、带通滤波器、放大电路以及 ADC。光敏检测器将 LED 发出的光信号转换为电信号,带通滤波器可以滤除直流分量以及带外的干扰信号,放大电路将电信号放大至 ADC 采样范围内,ADC 将模拟信号转换为数字信号进行参数估计。

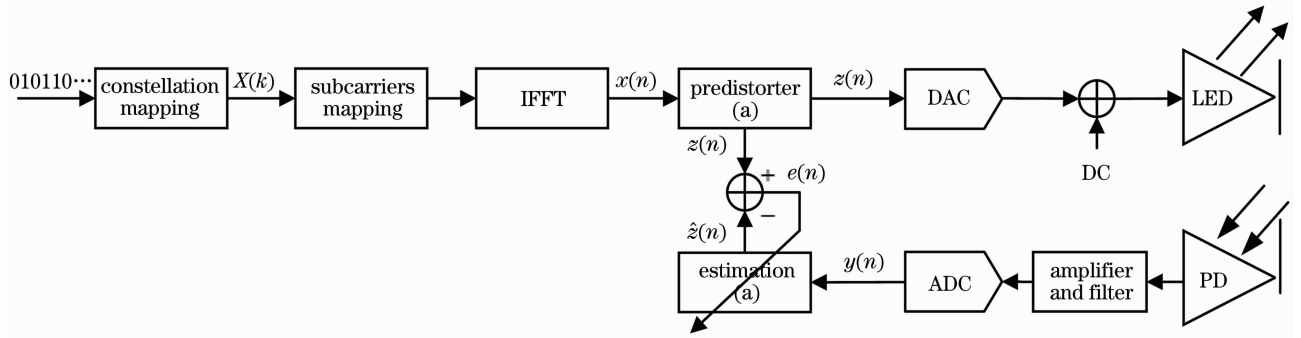


图 4 具备自适应预失真技术的 DCO-OFDM 系统发射机结构

Fig. 4 Block diagrams of a DCO-OFDM transmitter with adaptive predistortion technique

本架构采用的是间接学习模型,即不直接估计 LED 的非线性,而是估计 LED 的逆特性曲线。该模型的优势是避免了先估计 LED 参数再进行求逆操作。当参数估计模块算法收敛后,直接将参数复制到预失真模块。理论上来说,添加了预失真模块后,LED 的输出与输入信号  $x(n)$  呈线性关系。

### 3.2 预失真算法

如图 4 所示,  $x(n)$  是原始的基带输入信号,  $y(n)$  是归一化后 PD 的输出信号,  $z(n)$  是 LED 的输入信号同时也是预失真模块的输出信号。  $\hat{z}(n)$  是预

失真估计模块的输出信号。记忆多项式模型被广泛应用于无线通信系统中射频功率放大器的记忆非线性建模研究,本文也采用该模型来描述 LED 的记忆非线性特性。

因此,参数估计模块的输出为

$$\hat{z}(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{d=0}^D a_{k,d} y^k(n-d), \quad (2)$$

式中  $k$  为多项式阶数,  $K$  为多项式点阶数,  $d$  为延迟数,  $D$  为最大延迟数,  $a_{k,d}$  为记忆多项式模型参数。

定义向量为

$$\mathbf{a} = [a_{1,0}, a_{2,0}, \dots, a_{K,0}, a_{1,1}, a_{2,1}, \dots, a_{K,1}, \dots, a_{1,D}, a_{2,D}, \dots, a_{K,D}]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(n) = [y(n), y^2(n), \dots, y^K(n), y(n-1), y^2(n-1), \dots, y^K(n-1), \dots, y(n-D), y^2(n-D), \dots, y^K(n-D)], \quad (4)$$

(3)式中上角标 T 表示矩阵转置。因此,(2)式的向量表示为

$$\hat{z}(n) = \mathbf{y}(n) \cdot \mathbf{a}, \quad (5)$$

误差信号为

$$e(n) = z(n) - \hat{z}(n) = z(n) - \mathbf{y}(n) \cdot \mathbf{a}. \quad (6)$$

非线性模型参数的最小二乘(LS)解可以通过最小化误差信号的功率求解。该算法的目标函数为

$$\operatorname{argmin}_a \sum_{n=0}^{N-1} e^2(n) = \operatorname{argmin}_a \sum_{n=0}^{N-1} [z(n) - \mathbf{y}(n) \cdot \mathbf{a}]^2, \quad (7)$$

非线性模型参数对应的 LS 解为

$$\mathbf{a} = (\mathbf{Y}^H \mathbf{Y})^{-1} \cdot \mathbf{Y}^H \mathbf{z}, \quad (8)$$

式中上角标 H 表示共轭转置。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}(0) \\ \mathbf{y}(1) \\ \vdots \\ \mathbf{y}(N-1) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{z} = [z(0), z(1), \dots, z(N-1)]^T. \quad (10)$$

由(8)式可知,最小二乘(LS)算法求解需要对矩阵  $\mathbf{Y}^H \mathbf{Y}$  进行求逆,这一过程需要对一整块数据进行操作,换句话说,LED 的记忆非线性参数不能实时地更新。此外,直接的矩阵求逆对基带信号处理器的要求很高。在实际系统中,普遍使用的是一些实时处理算法,例如迭代最小二乘(RLS)算法。

RLS 算法的迭代过程为<sup>[19]</sup>

$$\mathbf{P}(n) = \mathbf{P}(n-1) - \frac{\mathbf{P}(n-1) \mathbf{y}^H(n) \mathbf{y}(n) \mathbf{P}(n-1)}{1 + \mathbf{y}(n) \mathbf{P}(n-1) \mathbf{y}^H(n)}, \quad (11)$$

$$\mathbf{a}(n) = \mathbf{a}(n-1) + \frac{\mathbf{P}(n-1) \mathbf{y}^H(n)}{1 + \mathbf{y}(n) \mathbf{P}(n-1) \mathbf{y}^H(n)} [z(n) - \mathbf{y}(n) \cdot \mathbf{a}(n-1)], \quad (12)$$

式中  $\mathbf{P}(n)$  是由前  $n$  个采样点构成的  $\mathbf{Y}^H \mathbf{Y}$  的逆矩阵,初始化为  $\mathbf{P}(-1) = \lambda^{-1} \mathbf{I}$ ,  $\lambda$  为任意小的常数,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。为了保证预失真模块的增益为 1,记忆非线性参数被初始化为  $\mathbf{a}(-1) = [1, 0, \dots, 0]^T$ 。

## 4 性能分析

通过仿真测试接收端的 BER 和 EVM 来验证自适应预失真算法的性能。基带测试信号采用 DCO-OFDM 信号,带宽为 5 MHz,在 LED 的 3 dB 调制带宽内,IFFT 长度为 128,其中 1~63 个子载波映射的是频域数据  $X(k)$ , -63~-1 个子载波映射的是频域数据的复共轭  $X^*(k)$ ,映射方式是 64 正交幅度调制(64-QAM,即 6 bit/Hz)。LED 的偏置电压为 3.2 V。信道采用加性高斯白噪声(AWGN)信道。

### 4.1 比特误码率性能

实验中 1000 个 OFDM 符号被用来测试 VLC

系统的 BER 性能,其中 2 个 OFDM 符号用作信道估计。图 5 为 BER 性能图,横坐标为信噪比(SNR)。其中,红线是没有预失真算法(MLPM)的性能,黑线是没有考虑记忆效应的预失真算法(MPM)的性能,蓝线是考虑记忆效应预失真算法的性能,绿线是 BER 的理论值。由图 5 可知,记忆效

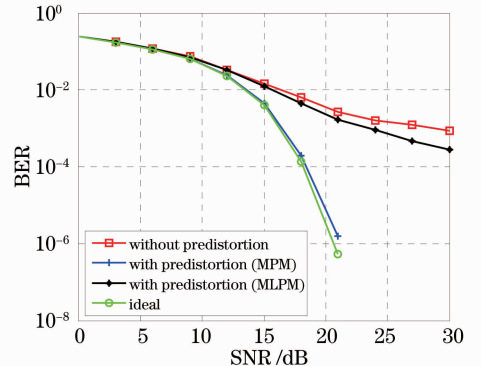


图 5 VLC 系统 BER 性能曲线

Fig. 5 BER performance of the VLC system

应是影响 VLC 系统性能的关键因素,考虑记忆效应时预失真算法性能相较没有考虑记忆效应有显著提升。

#### 4.2 误差矢量幅度性能

为了进一步测试自适应预失真算法的性能,实验比较了考虑记忆效应和没有考虑记忆效应算法的星座图。测试信道是 AWGN 信道,SNR 值  $R_{SN} = 20$  dB。

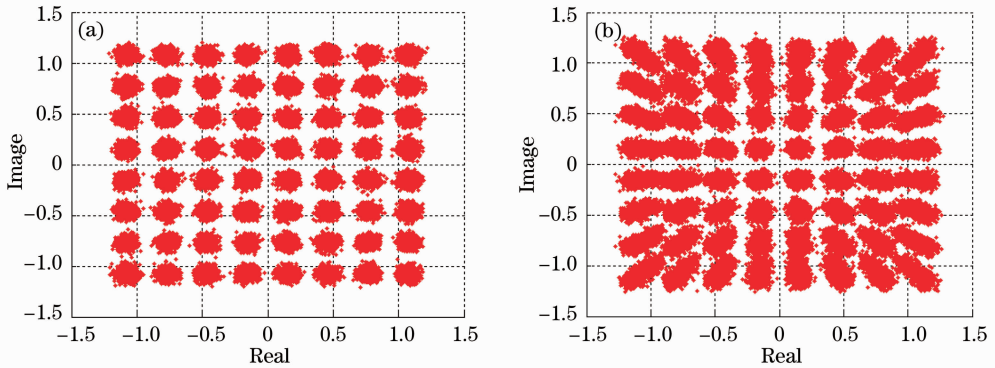


图 6 64-QAM 调制星座图。(a)考虑记忆效应, $M_{EV} = -33.0$  dB;(b)没有考虑记忆效应, $M_{EV} = -17.8$  dB

Fig. 6 Constellation diagrams for 64-QAM. (a) With memory effects,  $M_{EV} = -33.0$  dB; (b) Without memory effects,  $M_{EV} = -17.8$  dB

## 5 结 论

LED 是 VLC 系统中最主要的非线性器件,由于非平坦的频率响应体现出记忆效应。提出了一种新的基于间接学习模型的自适应预失真架构,即在发射端引入一条反馈链路来跟踪并补偿 LED 的记忆非线性。行为模型采用结构简单、稳健性较好的记忆多项式模型。仿真实验结果显示,考虑了记忆效应的自适应预失真算法显著提升了 VLC 系统的 BER 性能,星座图的比较也直观地验证了这一算法的有效性。

### 参 考 文 献

- 1 Dupuis R D, Krames M R. History, development, and applications of high-brightness visible light emitting diodes[J]. J Lightwave Technol, 2008, 26(9): 1154—1171.
- 2 Minh H, Ghassemlooy Z, O' Brien D, *et al.*. Indoor gigabit optical wireless communications: Challenges and possibilities[C]. 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2010, Th. A3.1: 1—6.
- 3 Zeng L, O' Brien D, Minh H, *et al.*. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting [J]. IEEE J Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1654—1662.
- 4 Li Rongling, Shang Huiliang, Lei Yu, *et al.*. Research of key enabling technologies for high-speed visible-light communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050003. 李荣玲,商慧亮,雷雨,等. 高速可见光通信中关键使能技术研

图 6 为 64-QAM 的星座图。图 6(a)为考虑了记忆效应的自适应预失真算法的性能,图 6(b)为没有考虑记忆效应自适应预失真算法的性能。由图 6 可知,考虑记忆效应的自适应预失真算法的性能较优,星座点非常清晰,对应的 EVM 值  $M_{EV} = -33.0$  dB,而未考虑记忆效应的自适应预失真算法的星座图比较模糊,对应的 EVM 值  $M_{EV} = -17.8$  dB。星座图越模糊,接收端 BER 的性能越差。

究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050003.

- 5 Fu Hongshuang, Zhu Yijun. Analysis of the correlation of optical multiple-input multiple-output channel using white LED lighting in indoor line of sight environments[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906002. 付红双,朱义君. 室内直射环境下白光 LED 的多输入多输出信道相关性分析[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906002.
- 6 Yang Yu, Zhang Jiankun, Liu Bo, *et al.*. Study of the impact of LED nonlinearity on orthogonal frequency division multiplex based visible light communication systems[J]. Chinese J 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 Elgala H, Mesleh R, Haas, H. A study of LED nonlinearity effects on optical wireless transmission using OFDM[C]. IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 2009. 1—5.
- 8 Asatani K, Kimura T. Linearization of LED nonlinearity by predistortions[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 1978, 13(11): 133—138.
- 9 Elgala H, Mesleh R, Haas, H. Predistortion in optical wireless transmission using OFDM[C]. 9th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS), 2009, 2: 184—189.
- 10 Kamalakis T, Walewski J W, Ntogari G, *et al.*. Empirical volterra-series modeling of commercial light-emitting diodes[J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(14): 2146—2155.
- 11 Su Chen, Chen Guichu, Zheng Shuwen, *et al.*. Response characteristic of blue light-emitting diodes [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0623002. 苏晨,陈贵楚,郑树文,等. 蓝光发光二极管的响应特性[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0623002.
- 12 Ding L, Zhou G T, Morgan D R, *et al.*. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials[J].

- IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(1): 159 – 165.
- 13 OSRAM Opto Semiconductors. Datasheet: LE UW S2LN-NYPX-5E8G[R]. 2011.
- 14 Hu Dewen, Wang Zhengzhi. An identification method for the Wiener model of nonlinear systems[J]. Acta Automatic Sinica, 1991, 17(2): 151–159.  
胡德文,王正志. 非线性系统 Wiener 模型辨识[J]. 自动化学报, 1991, 17(2): 151–159.
- 15 Schetzen M. Nonlinear system modeling based on the Wiener theory[J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(12): 1557 – 1573.
- 16 Li Yanting, Li Zubo, Zhang Hongwei, *et al.*. Limit communication rate of visible light communication data-link based on discrete multi-tone modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(12): 1414–1420.  
李艳婷,李祝博,张红伟,等. 离散多音调制可见光通信链路的极限速率[J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1414–1420.
- 17 Armstrong J. OFDM for optical communications [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(3): 189–204.
- 18 Zhang Jiankun, Yang Yu, Chen Hongda. Modulation scheme analysis of indoor visible light communications[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405003.  
张建昆,杨宇,陈弘达. 室内可见光通信调制方法分析[J]. 中国激光, 2013, 38(4): 0405003.
- 19 Mathews V J. Adaptive polynomial filters [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1991, 8(3): 10–26.

栏目编辑: 王晓球