

LED 非线性对基于正交频分复用可见光通信系统的影响

杨宇 张建昆 刘博 陈弘达

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 基于带有寄生参数的发光二极管(LED) Shockley 方程, 结合具有饱和特性的固态功率放大器的幅度传输模型, 构建了可见光通信系统中 LED 的双向饱和和非线性模型。基于该模型, 通过蒙特-卡洛仿真分析了 LED 非线性对采用正交频分复用(OFDM)的可见光通信系统(VLC)性能的影响。分析结果表明 OFDM 的 VLC 系统性能受 LED I - V 特性非线性、直流偏置电压、基带调制方式、调制信号切顶比率及方式的直接影响。

关键词 光通信; 可见光通信; 正交频分复用; 发光二极管; 非线性失真

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0805007

Study of the Impact of LED Nonlinearity on Orthogonal Frequency Division Multiplex Based Visible Light Communication Systems

Yang Yu Zhang Jiankun Liu Bo Chen Hongda

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract From the light-emitting diode (LED) Shockley equation, a LED's bidirectionally saturated nonlinearity model in visible light communication (VLC) system is established in conjunction with high power amplifier model which shows saturated behavior at very large input voltage. Monte Carlo simulations are conducted to an orthogonal frequency division multiplex (OFDM) based VLC system using the LED model. Manifold analyses suggest that the system performance deeply depends on some key parameters in respect of LED nonlinearity, direct current (DC) bias voltage, baseband modulation scheme, signal clipping ratio, and the manner in which the signal is clipped.

Key words optical communications; visible light communications; orthogonal frequency division multiplex; light-emitting diode; nonlinearity distortion

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 060.4080

1 引言

发光二极管(LED)因其节能、环保、高亮度、使用寿命长等诸多优点成为极具前景的照明设备。LED 兼具极快的响应速度和较宽的调制带宽, 在满足照明要求的同时具备传输数据的潜力, 从而构成可见光通信系统(VLC)^[1,2]。VLC 所采用的可见光频段无需频率授权许可, 实现成本非常低, 通信安全

性和空间复用性都很高, 使得 VLC 在世界范围内日益引起广泛关注^[3,4]。

正交频分复用(OFDM)有极高的频谱效率、较低的码率并具有循环前缀结构等特性, 非常适合在光纤通信中解决色散、偏振模色散等问题^[5,6]; 在自由空间光通信中 OFDM 也被提出用于解决大气信道中的散射等问题^[7]。在基于 LED 的 VLC 系统

收稿日期: 2011-02-22; **收到修改稿日期**: 2011-03-30

基金项目: 国家 863 计划(2010AA0321614001)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(2006A10401006)资助课题。

作者简介: 杨宇(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事甚短距离光传输系统及可见光通信系统等方面的研究。

E-mail: yangyu@semi.ac.cn

导师简介: 陈弘达(1960—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子与微电子集成器件、集成电路与系统等方面的研究。E-mail: hdchen@semi.ac.cn

中,通过滤除响应速度较慢的荧光成分,调制带宽得以从几兆赫兹拓展到十几兆赫兹^[8],在此基础上 OFDM 得以应用于 VLC 以对抗多径效应,实现高速的数据传播和通信^[9~12]。

OFDM 对频率偏差和相位噪声十分敏感,而较高的时域信号峰均功率比(PAPR)对放大器线性的要求很高^[13]。在采用离散多频声(DMT)和 OFDM 的 VLC 系统中,LED 被认为是非线性的主要来源^[14,15]。1) LED 的 $I-V$ 特性本身呈非线性;2) 为确保 LED 的安全工作,以及受数模转换器的有限字长效应等限制,需要对调制信号进行软切顶或硬切顶以限制调制功率^[15,16],从而引入更多的非线性问题。因此有必要对 LED 的非线性进行分析研究。Elgala 等^[16]参考 Rapp 等^[17]的固态功放模型,提出了一种对 LED 调制电流的软切顶模型,并且其结果显示软切顶性能优于硬切顶。但实际应用该方法对不同类型 LED 进行建模分析时仍存在问题:该模型所需的超过 LED 最大浪涌电流的 $I-V$ 数据的获取与测量存在困难,且物理意义不够清晰。本文在此基础上提出了一种基于部分 $I-V$ 数据,构建具有双向饱和特性的 LED 非线性模型的有效方法。基于该建模结果对 LED 非线性对 OFDM 系统的影响进行了多方面的仿真分析,并对结果进行了相关讨论。

2 OFDM 系统模型

用一组并行的复频域数字基带符号分别去调制一组频率正交子载波,构成 OFDM 符号的时域表达式为

$$s(t) = \begin{cases} \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}} d_{i+N_s/2} \exp\left[j2\pi \frac{i}{T}(t-t_s)\right], & (t_s \leq t \leq t_s + T) \\ s(t) = 0, & (t < t_s \text{ or } t > t_s + T) \end{cases} \quad (1)$$

(1)式形式上等同于

$$s(n) = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp\left(j2\pi \frac{in}{N}\right) \quad (2)$$

所示的具有 N_s 点 M-QAM 复频域符号的离散傅里叶逆变换,因而借助快速傅里叶变换(IFFT)算法就可以实现快速有效的 OFDM 信号调制。在接收端,经过时域和频域的同步、信号采样,通过 N_s 点快速傅里叶变换(FFT)可以完成所有子载波通道的数据解调^[13]。

图 1 为可见光 OFDM 系统的发射与接收流程。在强度调制的 VLC 系统中,可以用加性白色高斯(AWGN)信道作为信道模型,包含背景光噪声、接收机散粒噪声、热噪声等^[18]。强度调制要求发射光强不能为负,因此 OFDM 系统信道模型中需要加入 LED 直流偏置点。

在光 OFDM 系统中,通常使发射端频域符号在子载波上的映射成共轭对称性,从而使 IFFT 后 OFDM 基带时域信号为实数,便于基带信号的直接传输^[9]。以 48 路子载波的 OFDM 系统为例,如表 1 所示,D1,D2,⋯表示相应子载波通道的复频域符号,D1*,D2*,⋯为其复共轭。因子载波中有一半通道携带了冗余信息,代价是使带宽效率下降 1/2。

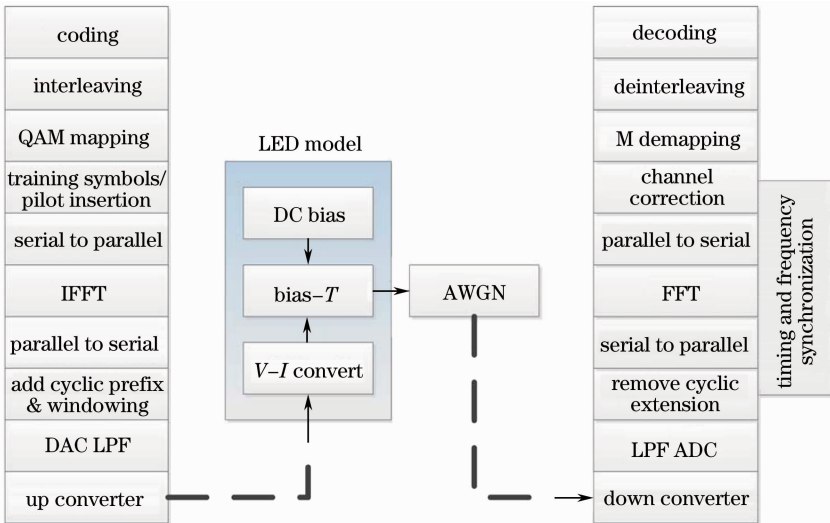


图 1 OFDM VLC 系统发射接收流程图

Fig.1 Flow chart of transmitting and receiving of an OFDM based VLC system

表 1 具有共轭对称性的 48 子载波通道频域符号映射

Table 1 Mapping of 48-subcarriers frequency domain symbols with conjugative symmetry

Index	0	1	2	...	22	23	24	25	26	...	46	47
Symbol	0	D23*	D22*	...	D2*	D1*	0	D1	D2	...	D22	D23

3 LED 的非线性模型

当串、并联电阻等寄生参数存在,同时不考虑 LED 发热效应的影响时,表示 LED $I-V$ 特性的 Shockley 方程^[19]为

$$I - \frac{(V - IR_s)}{R_p} = I_s \exp\left[\frac{e(V - IR_s)}{n_{ideal}kT}\right], \quad (3)$$

式中 R_s 为寄生串联电阻, R_p 为寄生并联电阻, k 为玻尔兹曼常数, T 为 LED 结温; n_{ideal} 为 LED 的理想化因子, 对于 GaN/GaInN 蓝光 LED, 其值约为 7.0; I_s 为与 LED 材料及结构相关的常数, 具有电流的量纲。当 R_p 接近无穷大时(3)式可表示为

$$V = \frac{n_{ideal}kT}{e} \ln\left(\frac{I}{I_s}\right) + R_s I. \quad (4)$$

基于此, LED 非线性建模过程可以表述如下:

1) 以 LED 制造商提供或测量所得的部分 $I-V$ 数据为基础。定义 V_{th} 为 LED 的开启电压, 首先将 $I-V$ 曲线在平面上沿电压轴反方向平移 V_{th} , 开启电压与坐标原点重合。平移后电压表示为 V_{shift} 。对 $I-V_{shift}$ 按下式拟合。

$$V_{shift}(I) = a \ln\left(\frac{I}{b}\right) + cI. \quad (5)$$

2) 将最大浪涌电流 I_{max} 代入(5)式拟合结果, 得到 LED 所允许的最大正向饱和电压 $V_{sat} = V_{shift}(I_{max})$ 。参考 Rapp 等^[17] 固态功放模型, 以 V_{sat} 作为其最大输出电压, 则有

$$V_{rout} = \frac{V_{rin}}{\left[1 + \left(\frac{V_{rin}}{V_{max}}\right)^{2p}\right]^{1/(2p)}} = \frac{V_{shift}}{\left[1 + \left(\frac{V_{shift}}{V_{sat}}\right)^{2p}\right]^{1/(2p)}}, \quad (6)$$

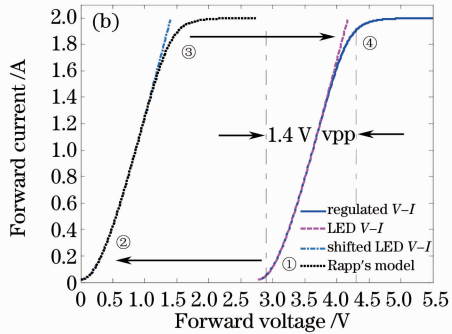
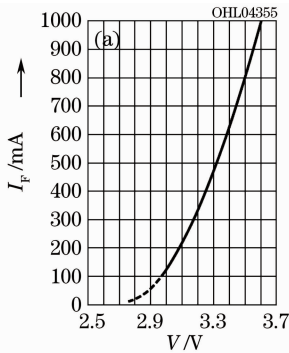


图 2 (a) OSRAM LUW CP7P LED $I-V$ 特性曲线; (b) 集成了 Rapp 功放模型的 LED 非线性建模流程

Fig. 2 (a) OSRAM LUW CP7P LED $I-V$ characteristic; (b) flow of LED nonlinearity modeling

incorporated Rapp's model of solid state power amplifier

式中 V_{rout} 在输入电压 V_{shift} 幅度较低时与其保持线性关系, 而幅度大于 V_{sat} 的部分将被软切顶。切顶圆滑程度由参数 p 确定, 该值越大圆滑程度越差, 反之则越好。

3) 如以函数 $I=f(v)$ 表示 LED 的 $I-V_{shift}$ 特性, 将切顶后电压向电压轴正方向平移 V_{th} , 得到最终建模结果, $I-V$ 特性可表示为

$$I = g(V_{in}) = \begin{cases} f(V_{rout}), & (V_{in} > V_{th}) \\ 0, & (V_{in} \leq V_{th}) \end{cases} \quad (7)$$

$$V_{rout} = \frac{V_{in} - V_{th}}{\left[1 + \left(\frac{V_{in} - V_{th}}{V_{sat}}\right)^{1/(2p)}\right]}, \quad (8)$$

式中 V_{in} 为 LED 的调制电压。通过上述过程, LED $I-V$ 曲线在小于开启电压 V_{th} 和超过最大浪涌调制电压 $V_{sat} + V_{th}$ 两处呈现双向饱和特性。

4 LED 非线性影响的仿真与分析

以典型 OSRAM LUW CP7P 大功率白光 LED^[20] 为代表, 应用上述方法进行建模, 流程如图 2(b) 所示。关键步骤如下:

1) 由制造商提供的该 LED 的 $I-V$ 特性见图 2(a), 开启电压 $V_{th} = 2.77$ V, 最大直流工作电流 1 A, 最大浪涌电流 $I_{max} = 2$ A, 额定功率 1 W。在高正向电压下 LED 器件仅能以脉冲方式工作, 而这并非此类照明用 LED 的典型应用, 因此调制电流在 1~2 A 范围内的 $I-V$ 数据并未直接给出。可以通过脉冲法进行实验测量^[21], 或在建模过程中采用

(5)式拟合结果进行外推。

2) 执行第 3 节步骤,得到 $V_{\text{sat}} = 1.41 \text{ V}$ 。取 Rapp 等^[17]功放模型中 $p=5$,得到建模后 LED 的 $I-V$ 特性如图 2(b)中实线所示。

表 2 列出了 OFDM 系统性能蒙特-卡洛仿真中采用的关键参数。为直接分析 LED 的非线性对 OFDM 系统性能的影响,仿真针对非编码 OFDM 系统,将省略编解码、二进制到多进制的映射及交织与解交织环节。

表 2 OFDM 及 LED 仿真参数

Table 2 Simulation parameters of OFDM and LED

Parameters	Value
Subcarriers	64(48 Non-zero)
IFFT/FFT points	128/256/512
IFFT/FFT time / μs	6, 4
Cyclic samples	32/64/128
Training symbols	5
Symbols per frame	50
Baseband modulation	QPSK/16-QAM/64-QAM
p (Rapp's model)	5

4.1 理想线性 OFDM 系统性能

首先对光源出光率与调制电压具有理想线性关系情况下,系统以不同基带调制方式、不同过采样率,通过 AWGN 信道时的误符号率(SER)进行了仿真,结果如图 3 所示。系统采用导频训练符号和接收端强制归零频域均衡信道估计算法,并且为提高信道估计的精确程度选取了能量较高的导频符号^[22]。对于 5 抽头的信道估计算法^[22],其信噪比(SNR)损失为 0.8 dB。结果显示系统误符号率在高阶的 M-QAM 基带调制方式下出现下限,分析其原因为过采样不足造成频谱混叠,形成 OFDM 频谱的

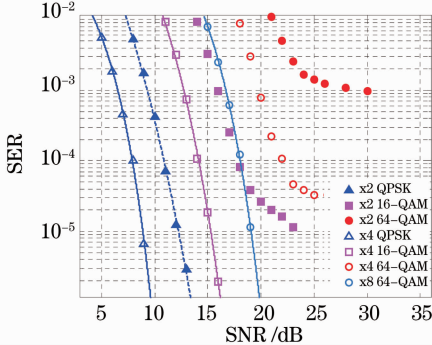


图 3 理想线性 AWGN 信道在不同调制方式、不同过采样率下的误符号率性能

Fig. 3 Symbol error rate of OFDM system in ideal linear AWGN channels different modulation schemes and different over sample rates

带内干扰。

4.2 LED $I-V$ 非线性的影响

进而考虑 LED $I-V$ 非线性对系统性能的影响,仿真结果如图 4 所示。在移动 LED 直流偏置点时,通过调整 D/A 映射关系,使调制信号低电压峰值恰不受 $I-V$ 饱和特性的切顶作用,即无切顶失真。随直流偏置点降低,偏置点附近动态范围区间线性度减小,非线性失真增加造成性能恶化。

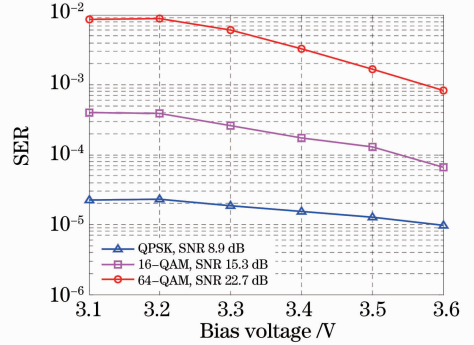


图 4 采用 LED 非线性模型,不同直流偏置电压下无切顶失真系统的误符号率

Fig. 4 Symbol error rate performance without signal clipping distortion at different DC bias voltages when LED nonlinear model is applied

对于子载波数较多(不小于 10)的 OFDM 的时域信号,其幅值符合高斯分布,概率密度函数表示为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (9)$$

式中 μ 为 LED 直流偏置电压, σ^2 为方差。因此,建模后 $I-V$ 特性中偏离理想线性的部分可以等效为高斯白噪声 n_{nl} ^[22],叠加在接收机固有高斯白噪声 n_{avg} 之上,构成等效噪声

$$n_{\text{eff}}^2 = n_{\text{avg}}^2 + n_{\text{nl}}^2, \quad (10)$$

式中 n_{nl}^2 可表示为

$$n_{\text{nl}}^2 = \int_{\text{vpp}_-}^{\text{vpp}_+} [x - g_u(x)]^2 p(x) dx. \quad (11)$$

式中积分限 vpp_+ 、 vpp_- 表示信号的动态范围, $g_u(x)$ 表示通过 LED 直流偏置点,描述 LED 理想线性 $I-V$ 特性的直线函数。偏离线性较多时(11)式积分结果相对 n_{avg}^2 项较大,等效噪声上升,误符号率上升。

4.3 LED $I-V$ 切顶特性的影响

在 4.2 节的基础上,对 LED 的 $I-V$ 切顶特性进行了仿真,结果如图 5 所示。

仿真中通过引入信号幅值的缩放系数作为横坐标来描述不同的调制功率。为讨论方便,不失一般

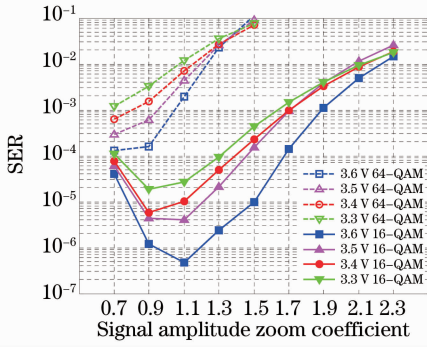


图5 16-QAM基带调制,不同直流偏置电压,不同调制功率下系统的误符号率性能

Fig. 5 16-QAM symbol error rate performance with different modulation signal powers at different DC bias voltages

性地,设定缩放系数为0.7时16-QAM/64-QAM接收机信噪比分别为15.3 dB/22.7 dB。在16-QAM调制方式下,随信号功率增大,接收信噪比增加,误符号率先呈下降趋势。随信号功率继续增加,切顶失真程度严重,导致误符号率上升。这与Dixon等^[23]所讨论的实验结果一致。

信号切顶失真同样可以等效为高斯白噪声^[22],

这在(10)式的基础上增加 n_{clip} 项,表示因切顶造成的交流信号功率损失,表达式为

$$n_{\text{eff}}^2 = n_{\text{avg}}^2 + n_{\text{nl}}^2 + n_{\text{clip}}^2, \quad (12)$$

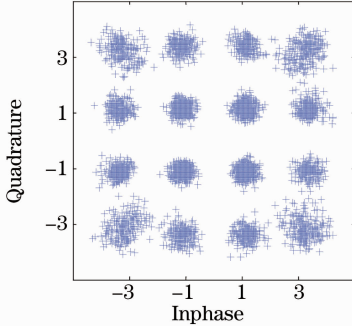
式中 n_{clip}^2 可表示为

$$n_{\text{clip}}^2 = \int_{k_1\delta+\mu}^{\infty} (x - k_1\delta - \mu)^2 p(x) dx + \int_{-\infty}^{\mu-k_2\delta} (x - k_2\delta - \mu)^2 p(x) dx \approx$$

$$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma^2 \left[k_1^{-3} \exp\left(\frac{-k_1^2}{2}\right) + k_2^{-3} \exp\left(\frac{-k_2^2}{2}\right) \right], \quad (13)$$

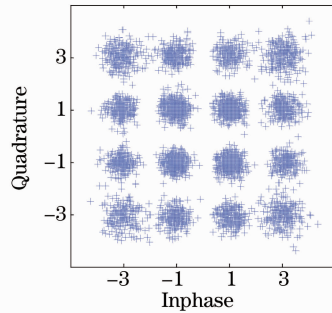
(13)式中 k_1, k_2 分别为信号幅值在上下两个方向上的切顶比率。非对称切顶发生时, n_{clip} 的量级主要取决于切顶较为严重的一方。与对称切顶相比, n_{avg} 相同情况下等效噪声功率 n_{clip} 更大。该结论可由图6仿真结果证实。图6(a)、(b)中,左图为对称切顶,接收星座图质量优于右图非对称切顶时的情况。同时,在图中可以观察到随机相位噪声对接收星座图的影响。对于能量较高的星座符号,其在复平面中距原点的欧氏距离较大,受相位噪声影响,误符号率更为严重。

received constellations after 1024-FFT demodulation
AWGN channel, SNR is 22.0148 dB

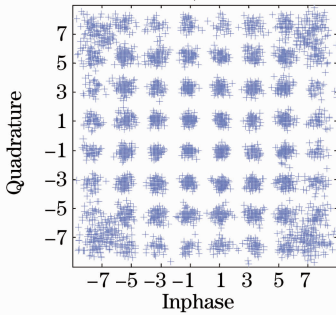


(a)

received constellations after 1024-FFT demodulation
AWGN channel, SNR is 22.4504 dB



received constellations after 1024-FFT demodulation
AWGN channel, SNR is 27.7362 dB



(b)

received constellations after 1024-FFT demodulation
AWGN channel, SNR is 27.9999 dB

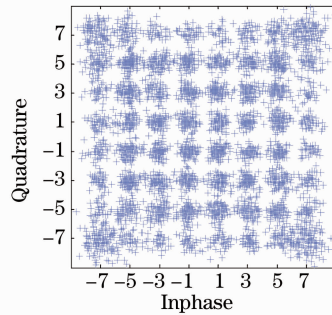


图6 不同直流偏置点,信号切顶失真下系统的接收星座图。(a) 16-QAM,直流偏置点3.6/3.3 V,幅值缩放系数为1.7;(b) 64-QAM,直流偏置点3.6/3.3 V,幅值缩放系数为1.3

Fig. 6 Received constellations at different bias voltages with signal clipping distortion. (a) 16-QAM, 3.6/3.3 V DC bias, amplitude zoom coefficient 1.7; (b) 64-QAM, 3.6/3.3 V DC bias, amplitude zoom coefficient 1.3

5 结 论

在强度调制的 OFDM VLC 系统中 LED 的 $I-V$ 特性的非线性增加了额外的等效高斯噪声,并使系统性能下降。调制功率受限时 $I-V$ 曲线在阈值电压和最大浪涌电压处呈现双向饱和特性,调制信号幅值大于线性动态范围的部分将被切顶。仿真结果表明系统存在最优的信号调制功率,并且对称切顶方式优于非对称切顶。各种不利因素都对高阶 M-QAM 调制影响更为突出。本文提出的 LED 非线性模型将有助于分析 LED 的直流偏置点、信号发射功率、基带调制方式、切顶方式等诸多因素,为构建性能优良的 OFDM VLC 系统提供指导作用。建模过程中,所有操作都为在 D/A 转换之前所进行的数学处理,而非针对 LED 调制电流,因而物理意义清晰,更接近以数字信号处理(DSP)为实际系统工作流程。

参 考 文 献

- 1 T. Komine, Y. Tanaka, S. Haruyama *et al.*. Basic study on visible-light communication using light emitting diode illumination [C]. 8th International Symposium on Microwave and Optical Technology, 2001. 45~48
 - 2 Y. Tanaka, S. Haruyama, M. Nakagawa. Wireless optical transmission with the white colored LED for the wireless home links[C]. 11 th Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000. 1325~1329
 - 3 R. D. Dupuis, M. R. Krames. History, development, and applications of high-brightness visible lightemitting diodes[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(9): 1154~1171
 - 4 H. L. Minh, Z. Ghassemlooy, D. O'Brien *et al.*. Indoor gigabit optical wireless communications: Challenges and possibilities[C]. ICTON 2010, Th. A3.1
 - 5 Lin Cheng, He Wen, Xiaoping Zheng *et al.*. Predistortion of high speed optical OFDM signal for aliasing-free receiving in multiple low-bandwidth receiver system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 377~380
 - 6 Jing Shao, Wei Li, Xiaojun Liang. Phase pre-emphasis for PAPR reduction in optical OFDM systems based on OIDFT or time lens [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 875~880
 - 7 Zhao Li, Ke Xizheng, Wang Huiqin. A free space optical communication-orthogonal frequency division multiplexing model based on time frequency code [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2757~2762
- 赵 黎, 柯熙政, 王惠琴. 基于时频编码的自由空间光通信-正交频分复用系统模型[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2757~2762

- 8 D. O'Brien, H. L. Minh, L. Zeng *et al.*. Indoor visible light communications: challenges and prospects [C]. *SPIE*, 2008, **7091**: 709106
- 9 H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas. Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM[J]. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 2009, **55**(3): 1127~1134
- 10 S. K. Hashemi, Z. Ghassemlooy, L. Chao *et al.*. Orthogonal frequency division multiplexing for indoor optical wireless communication using visible light LED [C]. CNSDSP 2008. 174~178
- 11 H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas *et al.*. OFDM visible light wireless communication based on white LEDs[C]. P Vehicular Technology Conference, 2007. 2185~2189
- 12 J. Vučić, C. Kottke, S. Nerreter *et al.*. 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(24): 3512~3518
- 13 R. V. Nee, R. Prasad. OFDM for Wirelss Multimedia Communications[M]. London, Boston: Artech House, 2000. 33~117
- 14 I. Neokosmidis, T. Kamalakis, J. W. Walewski *et al.*. Impact of nonlinear LED transfer function on discrete multitone modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27** (22): 4970~4978
- 15 B. Inan, S. C. J. Lee, S. Rande *et al.*. The impact of LED transfer function nonlinearity on high-speed optical wireless communications based on discrete-multitone modulation [C]. Conference on Optical Fiber Communication, 2009, JThA52
- 16 H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas. An LED model for intensity-modulated optical communication systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(11): 835~837
- 17 C. Rapp. Effects of HPA-nonlinearity on a 4-DPSK/OFDM-signal for a digital sound broadcasting system [C]. Second European Conference on Satellite Communications, 1991. 179~184
- 18 J. B. Carruthers, J. M. Kahn. Modeling of nondirected wireless infrared channels[J]. *Communications, IEEE Transactions on*, 1997, **45**(10): 1260~1268
- 19 E. F. Schubert. Light Emitting Diodes. Second Edition[M]. New York: Cambridge University Press, 2006. 63~67
- 20 Osram Opto Semiconductors. Product Catalog[DB/OL]: <http://www.osram-os.com>, 2011
- 21 Lei Ruirui, Lü Yijun, Gao Yulin *et al.*. Measurement of the thermo-optic parameters of power LED on pulse current[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 342~345
- 雷瑞瑞, 吕毅军, 高玉琳 等. 脉冲法测试功率 LED 热光参数 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 342~345
- 22 W. Shieh, I. Djordjevic. OFDM for Optical Communications [M]. California, Burlington, London: Academic Press, 2010. 128~138
- 23 B. J. Dixon, R. D. Pollard, S. Iezekiel. A discussion of the effects of amplifier back-off on OFDM [C]. High Frequency Postgraduate Student Colloquium, University of Leeds, 1999. 14~19