

文章编号: 1000-7032(2018)05-0745-06

可见光通信中的白光 LED 非线性噪声分析

王志斌^{1*}, 董 伟¹, 任 英¹, 武素莲², 顾而丹¹

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 浙江杭申电气集团有限公司, 浙江 杭州 311234)

摘要: 针对 LED 的非线性特征, 提出一种计算 OOK 调制可见光通信系统的非线性噪声的方法, 进而求出传输信噪比以及误码率。运用 Matlab 仿真分析得出 LED 直流偏置点和误码率的关系曲线, 并通过可见光通信系统图像传输实验验证了该曲线的正确性。该曲线对于 LED 的型号和最佳偏置点的选取具有很好的指导意义。

关键词: 可见光通信; 白光 LED; OOK 调制; 非线性噪声; 误码率

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183905.0745

Nonlinear Noise Analysis About White LED in Visible Light Communication

WANG Zhi-bin^{1*}, DONG Wei¹, REN Ying¹, WU Su-lian², GU Er-dan¹

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Zhejiang Hangshen Electric Group Corp., LTD, Hangzhou 311234, China)

* Corresponding Author, E-mail: ioe@ysu.edu.cn

Abstract: An algorithm of nonlinearity noise led by LED nonlinearity was proposed. The signal-to-noise ratio and bit error rate of visible light communications system with OOK modulation could be obtained through the algorithm. The curve about the relation between LED bias point and bit error rate were plotted with Matlab simulation. The results were proved by visible light communication system image transmission experiment. The curve has great significance on the choice of proper LED model and bias point about VLC system experiment.

Key words: visible light communication(VLC); white LED; OOK modulation; nonlinearity noise; bit error rate(BER)

1 引 言

发光二极管(Light-emitting diode, LED)同白炽灯和节能灯等相比较,具有低耗能、高耐湿度、高稳定性、强适应性、安全无污染、能全彩显示等优点,已经被广泛用于信息发射、荧屏显示、照明等领域。2000年,可见光通信概念被提出,LED在满足照明的同时,因其极快的响应速度和较高的调制带宽具备传输数据的能力,从而被用于可

见光通信系统(VLC)^[1-2]。VLC利用的可见光波段频谱尚属空白,无需授权即可使用,通信安全性和空间复用性都很高,因此VLC的研究受到世界范围内的广泛关注^[3-4]。

可见光通信系统中最简单的调制系统是基于OOK调制的强度调制/直接检测(IM/DD)系统。Vucic等采用OOK调制技术达到230 Mbit/s的传输速率^[5]。中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室研究员陈弘达等设计了一种

收稿日期: 2017-09-04; 修订日期: 2017-11-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61107039); 河北省自然科学基金青年基金(F2012203202)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China(61107039); Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Hebei Province(F2012203202)

基于 OOK-NRZ 调制的模拟调制器,传输速率达到了 460 Mbit/s^[6]。

虽然 LED 的诸多优势能让可见光通信在无线通信中暂露头角,但是可见光通信的普及还有很长的路要走,系统的实现复杂度使之无法进入商业市场,同时 LED 的自身带宽限制、非线性等很大程度上影响了传输性质。本文通过研究 LED 的非线性特征,计算得出 LED 的偏置点和基于 OOK 传输系统的误码率的关系,该结果对于可见光通信研究中的 LED 型号选取和偏置点的选取都有重要的参考意义。

2 VLC 系统中的 LED 非线性噪声研究

2.1 LED 模型

有许多描述功率放大器输入电压和输出电压之间的非线性特征的模型,其中最简单直接的是固态功放模型(SSPR)^[7],该模型不仅表示了输入和输出的非线性特性,同时也考虑了切顶失真。在此基础上,建立 LED 的模型如下^[8]:

$$i_{\text{LED}}(v) = \begin{cases} h(v) & \text{if } v \geq 0 \\ 0 & \text{if } v \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

其中 $i_{\text{LED}}(v)$ 是正向导通电流, v 是 LED 两端电压。

$$h(v) = \frac{f(v)}{\left[1 + \left(\frac{f(v)}{i_{\text{max}}}\right)^{2k}\right]^{1/2k}}, \quad (2)$$

其中, i_{max} 表示最大浪涌电流, $f(v)$ 是从 LED 数据表中得到的 I - V 特性曲线, $f(v) = v/r$, r 为电阻,取值为 1Ω , k 表示切顶的圆滑程度。如图 1 所示, k 的取值越大,圆滑程度越高。

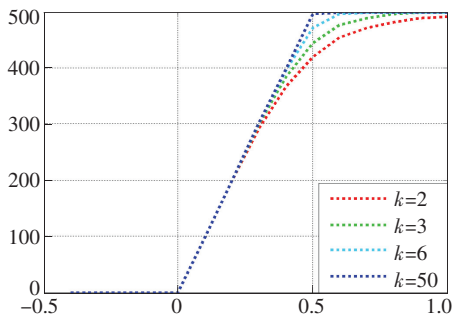


图 1 不同 k 值下的 LED 模型

Fig. 1 LED model under different k values

2.2 VLC 信道模型

可见光通信最简单的传输信道是强度调制/

直接检测(IM/DD),信道模型如图 2 所示,我们假设信道中的主要噪声来源于散粒噪声,并且其在仿真中设为加性高斯白噪声^[9],因此信道模型^[10]:

$$Y(t) = \gamma X(t) \otimes h(t) + N(t), \quad (3)$$

其中 $Y(t)$ 是接收机接收到的信号电流, $X(t)$ 是发射机的瞬时光功率, $h(t)$ 是脉冲响应, γ 是光探测器的灵敏度, $N(t)$ 表示高斯白噪声,符号“ \otimes ”表示卷积。

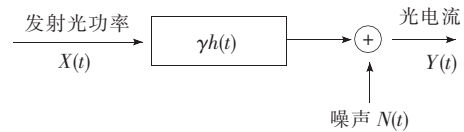


图 2 可见光通信传输模型

Fig. 2 VLC transmission model

因为 $X(t) \geq 0$, 发射机发出的平均光功率可以表示为:

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt, \quad (4)$$

而接收到的平均光功率为:

$$P = H(0)P_t, \quad (5)$$

其中信道直流增益为:

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt, \quad (6)$$

因此,接收端的信噪比为:

$$S/N = \frac{\gamma^2 P^2}{\delta_{\text{total}}^2} = \frac{\gamma^2 P^2}{\delta_{\text{shot}}^2 + \delta_{\text{thermal}}^2 + \delta_n^2}, \quad (7)$$

由于信号经过信道、探测器、均衡器等,产生的噪声主要由散粒噪声、热噪声和码间干扰组成,而码间干扰在 IM/DD 传输信道中可以忽略不计^[9],所以

$$\delta_{\text{total}}^2 = \delta_{\text{shot}}^2 + \delta_{\text{thermal}}^2 + \delta_n^2, \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta_{\text{shot}}^2 &= 2q\gamma PB + 2qI_{\text{bg}}I_2B, \\ \delta_{\text{thermal}}^2 &= \frac{8\pi kT_k}{G}\eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 kT_k \Gamma}{g_m}\eta^2 A^2 I_3 B^3, \end{aligned} \quad (9)$$

δ_n^2 是 LED 的非线性噪声, q 是电子的电量, B 是接收电路的等效噪声带宽, I_{bg} 是背景电流, 噪声带宽因子 $I_2 = 0.562$, k 是玻尔兹曼常数, T_k 是绝对温度, G 是开环电压增益, η 是探测器单位面积的固定电容, Γ 是 FET 沟道噪声因子, g_m 是 FET 的跨导, $I_3 = 0.0868$ 。在本次研究中,其他参数取值^[11]: $T = 295 \text{ K}$, $\gamma = 0.54 \text{ A/W}$, $G = 10$, $g_m = 30 \text{ mS}$, $\Gamma = 1.5$, $\eta = 112 \text{ pF/cm}^2$, 选择 $B = 100 \text{ Mb/s}$, 同时假

设背景电流来自直射光线^[12]。

2.3 LED 非线性噪声

建立 LED 的等效模型,模型的 $I-V$ 曲线和过 LED 直流偏置点的理想的线性曲线偏移部分可以等效为噪声 δ_{ad}^2 ,表示为:

$$\delta_{ad}^2 = \begin{cases} \int_{v_1}^{2v_0-v_1} (g_u(v) - i_{LED}(v))^2 dv & v_0 < \frac{v_1 + v_u}{2} \\ \int_{2v_0-v_u}^{v_u} (g_u(v) - i_{LED}(v))^2 dv & v_0 \geq \frac{v_1 + v_u}{2} \end{cases}, \quad (10)$$

其中, $g_u(v)$ 表示过偏置点理想线性曲线, v_u 为 LED 的最大浪涌电压, v_1 为 LED 的开启电压。如图 3 所示,圆滑系数 $k=6$, $f(v)$ 来源于科锐的 MX-3 系列白光 LED 的数据手册,经由最小二乘模拟得到的 $I-V$ 曲线,直流偏置点取(3.4 V, 200 mA),开启电压为 2.79 V,最大浪涌电压 4 V。

2.4 VLC 系统性能分析

本文假设 OOK 调制解调信道为定向视距链路信道,接收端与发射端保持点对点的传输^[13],即

$$H(0) = \frac{A \cos(\varphi)}{2\pi d^2}, \quad (11)$$

因此接收到的信号功率

$$P = \frac{A \cos(\varphi)}{2\pi d^2} \cdot P_t. \quad (12)$$

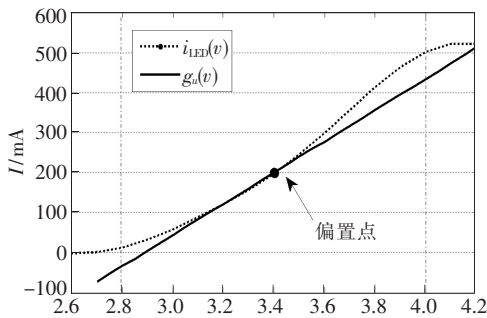


图 3 模型曲线和理想线性对比图

Fig. 3 Model curve and ideal linear curve comparison chart

LED 发射的信号功率随直流偏置点的变化随之也有所改变,在信号不失真的前提下,理想的发射功率为

$$P_t = \begin{cases} \int_{v_1}^{2v_0-v_1} g_u(v) dv & v_0 < \frac{v_1 + v_u}{2} \\ \int_{2v_0-v_u}^{v_u} g_u(v) dv & v_0 \geq \frac{v_1 + v_u}{2} \end{cases}, \quad (13)$$

本文采用的是 OOK 调制方式,通过对误码率的计

算分析系统的性能。误码率(BER)是表征数字通信系统性能的主要指标。本文通过 MATLAB 程序提取实验中传输图像的数据,将其转化为已知的序列数据,然后利用发送端发送该序列数据,当接收端接收到数据后,对其逐位校验。记所有数据总的二进制比特数为 Ball,错误的二进制比特数为 Ber,则误码率为 Ber/Ball^[14]。误码率的公式为:

$$R = Q(\sqrt{S/N}), \quad (14)$$

其中,

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2/2} du, \quad (15)$$

采用最小二乘拟合,得到 ML-B 系列 LED 的 $I-V$ 特性曲线,然后运用 Matlab 仿真得到在不同的直流偏置点下信号传输的误码率如图 4 所示。从图中可以看出在信号传输过程中噪声不变的情况下,随着 LED 两端的偏置电压不断增大,系统误码率逐渐减小。当达到最佳的偏置范围时,误码率又渐渐增大。这是因为较高发射功率可以提高系统的接收光功率,降低误码率,但是当逐渐增大功率时,信号受到 LED 非线性影响误码率反而较快地增加。最佳的偏置范围偏向较高电压区域,在 3.2 ~ 3.4 V 之间。

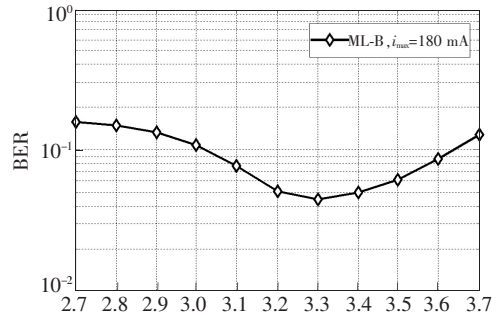


图 4 ML-B 系列不同偏置电压对应的 BER 值

Fig. 4 BER to different bias voltage of ML-B series

本文还选取了 3 种美国科瑞公司生产的白光 LED 系列,分别是 ML-B、ML-C、MX-3,并分别对它们进行上述分析,仿真结果如图 5 所示。图 5 反映了在理想传输模型中,传输过程的散粒噪声和热噪声相同的前提下,不同系列的白光 LED 的传输误码率和直流偏置电压的关系。

从图 5 可以看出 LED 的直流偏置电压在开启电压和最大浪涌电压中心偏最大浪涌电压的位置误码率较低;大功率 LED 的误码率相较于小功率 LED 的传输质量更高。

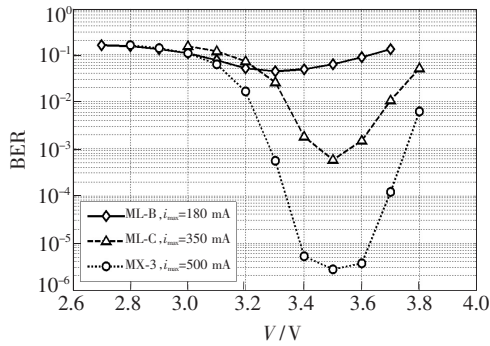


图5 不同系列 LED 的误码率与直流偏置电压的关系
Fig.5 Relationship between BER and DC bias voltage about Different LED series

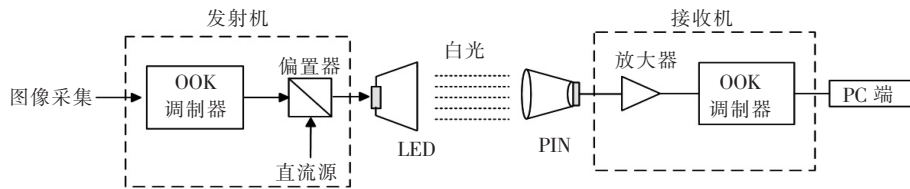


图6 VLC 系统整体示意图
Fig.6 Diagram of VLC system

引起的信号噪声,从而提高系统信息速率。而在接收部分对信号的后期处理技术,可以弥补信号失真,比如时间延迟等,最大程度还原出原始信号。系统采用调制解调器的目的在于在有限的 LED 响应带宽上获取更高的信息通讯速率。

3.2 LED 非线性噪声对 VLC 系统性能影响实验

可见光通信系统实验平台如图 7 所示,摄像头采集到的图像信息通过 STM32 实现 OOK 调制,经由 LED 发射,在空间传输,后由 APD 光电二极管接收和 STM32 模块解调,还原接收到的图像信息。图 8 是摄像头采集到的发射图像信息。

图 9 是在 LED 型号为 ML-B 时,正向偏置电



图7 可见光通信系统实验平台
Fig.7 VLC system experiment platform

3 实验验证

3.1 VLC 系统框图

基于白光 LED 的 OOK 调制 VLC 通信图像传输系统结构如图 6 所示,原始的图像采集信号经过预均衡和 OOK 调制处理之后,通过改变 LED 的发光强度的方式将电调制信号转换为光信号;信息通过光载波在自由空间中传输后由探测器接收,转换成电信号,经过后期处理解调在 PC 端上还原原始图像。预均衡,是为了将采集的原始信号转换成调制器可以识别的信号;另一方面,通过采用一定的预均衡技术可以降低系统器件或信道



图8 发射图像
Fig.8 Transmitted image

压不断变化下的接收图像和原图相对比得到的部分差值图像和 BER 数据信息。由差值图像可以看出,在发射图像颜色变换剧烈,即高频区时,产生的误码严重;联系图 10 的 ML-B 曲线信息,可以得出正向偏置电压在 3.3 V 左右时,图像误码率最小,偏离这个值,误码率逐渐变大。

图 10 中的误码率和 LED 偏置电压之间的关系与图 5 曲线走向大致相同,这基本验证了 LED 非线性噪声模型的正确性。将 LED 非线性模型运用于今后的可见光通信系统研究中,可以指导选取系统所匹配的 LED,节省购买各类 LED 的经费和测试 LED 带宽带来的时消耗,对实验的高效开展提供有力支持。

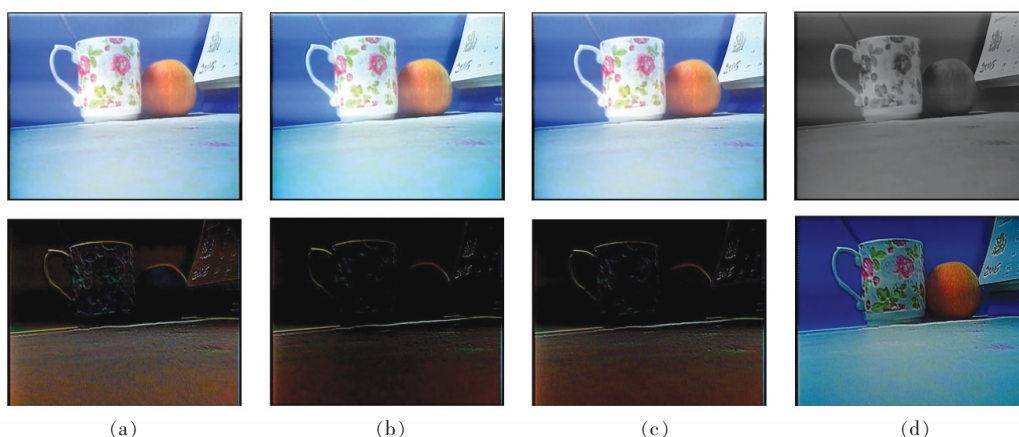


图9 接收图像(上)与发射图像的差值图像(下)对比。(a)正向电压3.0 V, BER:0.646 9;(b)正向电压3.3 V, BER:0.254 4;(c)正向电压3.5 V, BER:0.505 6;(d)正向电压3.8 V, BER:0.873 2。

Fig.9 Contrast of difference image between received images(up) and transmitted images(down). (a)0 V, BER: 0.646 9. (b)3.3 V, BER: 0.254 4. (c)3.5 V, BER: 0.505 6. (d)3.8 V, BER: 0.873 2.

同时,图10与图5的理论曲线比较,误码率相差几个数量级,出现这种情况的原因是实际实验中的热噪声和散粒噪声以及空间传输过程中的各类噪声远比理论的大得多,这也是未来LED可

见光通信系统从实验室走向市场需要攻克的一大难题。

4 结 论

影响可见光通信传输质量的一大因素就是白光LED的非线性特性,针对该特性,本文研究了LED非线性曲线和理想曲线的关系,提出了一种算法计算由非线性引起的噪声,进而计算了通信传输误码率,同时研究了3种LED的直流偏置点和误码率的关系。从仿真结果可以直观地得到最佳的LED类型及其偏置点,并通过实际的VLC系统验证了结果的正确性,该方法可为后续的可见光通信研究提供重要的理论参考。

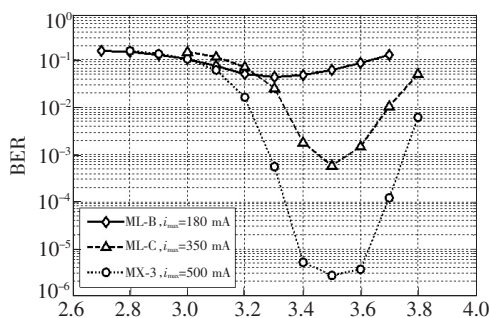


图10 不同系列LED下传输图像误码率的比较
Fig.10 BER of transmitted image under different LED series

参 考 文 献:

- [1] 王旭东,崔玉,吴楠,等.室内可见光无载波幅度相位调制系统性能分析[J].光子学报,2017,46(5):0506001. WANG X D, CUI Y, WU N, *et al.*. Performance analysis of optical carrierless amplitude and phase modulation for indoor visible light communication system [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2017, 46(5):0506001. (in Chinese)
- [2] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [C]. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE, London, UK, 2000:1325-1329.*
- [3] 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.
- [4] MINH H L, GHASSEMLOOY Z, O'BRIEND, *et al.*. Indoor gigabit optical wireless communications: challenges and possibilities [C]. *International Conference on Transparent Optical Networks, IEEE, Istanbul, Turkey, 2010:1-6.*
- [5] VUČIĆ J, KOTTKE C, NERRETER S, *et al.*. 230 Mbit/s via a wireless visible-light link based on OOK modulation of phosphorescent white LEDs [J]. *Opt. Fiber Commun.*, 2010, 45(2):1-3.

- [6] LI H, CHEN X, GUO J, *et al.*. An analog modulator for 460 MB/s visible light data transmission based on OOK-NRS modulation [J]. *IEEE Wireless Commun.*, 2015, 22(2):68-73.
- [7] CORVAJA R, COSTA E, PUPOLIN S. Analysis of M-QAM-OFDM transmission system performance in the presence of phase noise and nonlinear amplifiers [J]. *IEEE Xplore*, 1998, 1:481-486.
- [8] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. An LED model for intensity-modulated optical communication systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, 22(11):835-837.
- [9] CARRUTHERS J B, KAHN J M. Modeling of nondirected wireless infrared channels [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1997, 45(10):1260-1268.
- [10] KAHN J M, BARRY J R. Wireless infrared communications [J]. *IEEE Xplore*, 1997, 85(2):265-298.
- [11] TANG A P, KAHN J M, HO K P. Wireless infrared communication links using multi-beam transmitters and imaging receivers [J]. *IEEE Xplore*, 1996, 1:180-186.
- [12] MOREIRA A J C, VALADAS R T, DE O D A M. Optical interference produced by artificial light [J]. *Wireless Networks*, 1997, 3(2):131-140.
- [13] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2013, 31(7):1063-1072.
- [14] 杨欣华. 可见光通信系统建模与实验研究 [D]. 长春:吉林大学, 2015.
YANG X H. *Modeling and Experimental Study of Visible Light Communication System* [D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)



王志斌(1977 -),男,河北秦皇岛人,博士,教授,硕士生导师,2007年于燕山大学获得博士学位,主要从事光电测试技术及光通信的研究。

E-mail: ioe@ysu.edu.cn