

室内 VLC 白光 LED 调制带宽拓展

魏有财^{1,2}, 宋小庆^{1*}, 赵梓旭¹, 王慕煜¹

(1. 陆军装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072; 2. 95944 部队, 湖北 武汉 430313)

摘要: 针对室内照明场景应用需求, 探究了驱动电流的变化对四种常用 LED 光源频率特性所产生的影响效果, 得出荧光粉 LED 的频率特性响应几乎不受驱动电流变化的影响的结论。结合硬件预均衡策略对 1 W 荧光粉 LED 的调制带宽拓展进行了理论分析和硬件电路设计, 测试结果表明: 在不对蓝光过滤的条件下, 荧光粉 LED 调制带宽由 1 MHz 提高到了 32 MHz, 单盏荧光粉 LED 在非归零-开关键控(non-return-to-zero on-off-keying, NRZ-OOK)调制下可达到 26 Mbit/s 的传输速率, 误码率 7.55×10^{-6} , 传输距离达到 3 m, 符合于室内照明通信对传输距离的要求。

关键词: 室内; 可见光通信; 荧光粉 LED; 均衡

中图分类号: TN929.12 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0920004

White LED modulation bandwidth expansion based on indoor VLC

Wei Youcai^{1,2}, Song Xiaoqing^{1*}, Zhao Zixu¹, Wang Muyu¹

(1. Department of Control Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China;

2. 95944 Unit, Wuhan 430313, China)

Abstract: For the application requirements of the indoor lighting scenes, the effect on the frequency characteristics of four types common LEDs caused by the drive current fluctuations was researched, and the conclusion was that the frequency characteristic response of the phosphor LED was almost unaffected by the drive current variations. Combined with the hardware pre-equalization strategy, the theoretical analysis and the hardware circuit design to expand bandwidth of the 1 W phosphor LED were done. The experimental results prove that without the blue filter, the modulation bandwidth of the phosphor LED is increased from 1 MHz to 32 MHz, and 26 Mbit/s phosphor LED VLC covered 3 meters communications distance using non-return-to-zero on-off-keying (NRZ-OOK) modulation is realized with bit error ratio of 7.55×10^{-6} , which meets the requirements of the transmission distance in indoor VLC system.

Key words: indoor; visible light communication; phosphor LED; equalization

收稿日期: 2018-04-07; 修订日期: 2018-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(51507190); 陆军装备部重点实验室项目(2014zx28)

作者简介: 魏有财(1992-), 男, 硕士生, 主要从事可见光通信方面的研究。Email: aafewyc@163.com

通信作者: 宋小庆(1971-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆综合电子系统与可见光通信方面的研究。Email: swxq@vip.sina.com

0 引言

LED可见光通信技术是一种新兴的无线通信技术,它能够在实现室内照明的同时兼顾通信功能。LED作为半导体器件具有绿色环保、无电磁辐射、寿命长、功耗低等优点,极有可能取代白炽灯和荧光灯等传统照明器件成为第四代照明光源。随着制造工艺的改善以及生产成本的迅速降低,LED的市场占有率也逐渐提高,预计至2018年半导体照明普及率将达到80%^[1]。

目前,商用白光LED器件主要有两种,将红、绿、蓝芯片封装在一起的RGB-LED以及PC-LED(荧光粉LED)^[2]。荧光粉LED通过蓝光芯片发光并激发涂覆在表层的荧光粉发出黄光从而混合成白光,由于是单芯片发光,故驱动电路简单且光色稳定。RGB-LED中三种发光芯片不含荧光粉,但需要分别驱动三个独立芯片工作才能混合发出白光,因而驱动电路复杂,且存在长时间工作下光色发生飘移等问题,故其光源稳定性较低。因此,在需要根据室内环境变化自适应调整发光强度的应用场景中,RGB-LED的驱动策略也较荧光粉LED更加复杂。

调制带宽决定了通信系统的传输速率和传输容量,目前,商用荧光粉LED的调制带宽仅为几MHz左右,虽然RGB-LED不含荧光粉,但其调制带宽也仅为10MHz左右,这一现状限制了VLC通信系统传输速率的提升^[3]。其原因是由于当前LED的生产工艺主要考虑照明应用场景,而没有考虑通信应用领域。为此,有学者提出蓝光滤光技术^[4-6]和硬件均衡技术^[7-8]对LED调制带宽进行拓展。虽然二者对LED带宽的拓展有一定效果,但还存在两点不足:(1)蓝光滤光技术由于滤除了荧光分量,使得接收端接收到的光功率衰减严重,限制了VLC系统的传输距离。如参考文献[7]中的VLC系统传输距离仅为10cm,参考文献[4]中VLC系统传输距离为40cm,它们均不能满足室内照明通信要求。(2)由于硬件均衡电路中电阻电容等器件的参数固定,电路的补偿能力也就固定,该技术大部分情况下只针对固定频率响应的LED。如参考文献[6]、[8]采用的硬件均衡方案只在固定驱动电流下对单色LED发光芯片进行频率响应均衡,并没有分析和研究变驱动电流对

LED频率响应造成的影响。然而,在室内应用场景,VLC系统需根据环境光强的变化调节LED驱动电流大小,从而使室内环境的光照趋于稳定。

针对以上问题,文中分析研究了驱动电流的变化对LED频率响应的影响,进而选取了适合室内应用场景的单盏功率为1W的荧光粉LED光源进行带宽拓展,从而提高传输速率和系统稳定性,实现了非归零-开关键控(non-return-to-zero on-off-keying, NRZ-OOK)调制下26 Mbit/s的传输,误码率为 7.55×10^{-6} ,传输距离达到3m,由于大部分室内环境中天花板至办公桌的距离在3m范围内,因而该系统适用于室内办公环境。

1 VLC系统原理

可见光通信系统兼具照明和通信双重功能,其结构如图1所示。其主要由信号发送模块和信号接收模块两部分组成。可见光通信通常采用强度调制/直接检测的方式实现信息的发送和接收。强度调制是指数据传入系统的发射机后,发射机(transmitter)根据数据内容输出变化的驱动电流使LED发出强度变化的光信号,由光强信号承载有用信息向自由空间发送。直接检测是指系统接收机(receiver)中的光电探测器(PD)通过光电转换使接收到的光强信号按照一定比例转换为电压或电流信号,接着经接收机后续电路将电压或电流信号恢复成原始信息,实现信息传输功能。

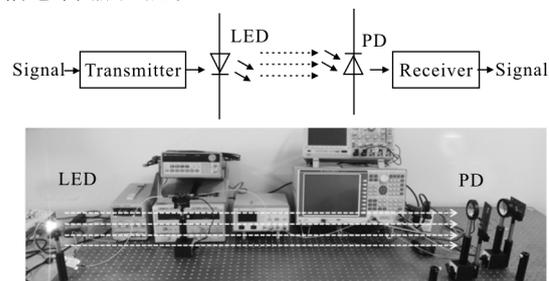


图1 可见光通信系统原理

Fig.1 Principle of visible light communication system

2 基于硬件预均衡LED带宽拓展机理

LED调制带宽的定义为:在输入信号幅值不变的情况下,LED输出交流光功率下降到某一低频参考频率值的一半时(-3 dB)的频率就是LED的调制

带宽^[9]。实际测试中,由于光电探测器响应电流大小与接收到的光功率呈线性关系,故常用光电探测器的响应电流变化来表征 LED 输出光功率的变化。其原理如图 2 所示。

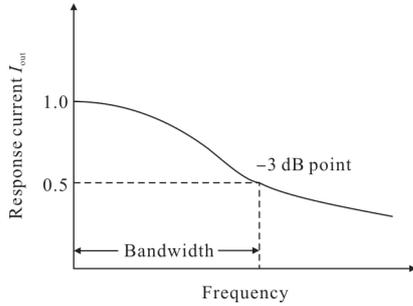


图 2 调制带宽定义

Fig.2 Definition of modulation bandwidth

从图 2 可以看出,当 VLC 系统传输速率达到一定高度时,信号变化的频率很高,当 LED 输出光功率的变化速率跟不上信号的变化速率时,LED 不能充分地输出光功率,就会导致光信号产生失真。为了弥补 LED 对高频相应的不充分性产生的输出光功率衰减现象,在信号光电转换前串接一个频率响应如图 3 所示的预均衡电路模块,对高频信号进行预加重处理,即预先提高高频分量幅值,使预加重后的高频分量在 LED 上发生衰减后能与低频信号的响应强度基本一致,从而补偿图 2 产生的衰减,得到更加平滑的频率响应曲线,实现 LED 的-3dB 调制带宽的拓展。

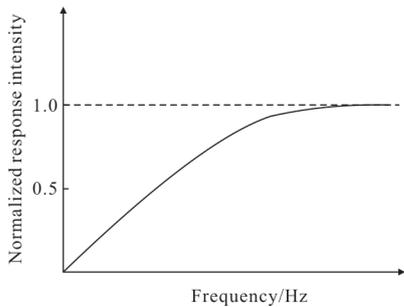
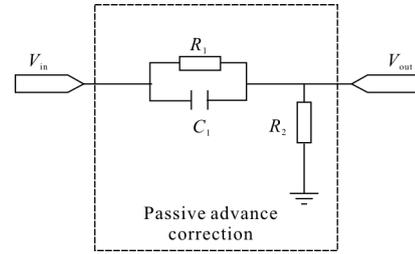


图 3 预均衡电路频率响应

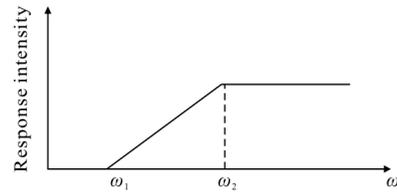
Fig.3 Frequency response of a pre-equalization circuit

根据控制理论中的超前校正思想,在驱动电路中可级联由电阻和电容元件组成的无源超前校正装置对高频信号进行预加重处理,提高信号的高频分量幅值^[10]。无源超前校正器电路结构及频率响应曲线如图 4 所示。



(a) 电路结构

(a) Circuit structure



(b) 频率响应曲线

(b) Frequency response curve

图 4 无源超前校正器

Fig.4 Passive advance correction

该无源超前校正装置的传递函数为:

$$H(\omega) = \frac{1}{\alpha} \times \frac{1+j\omega/\omega_1}{1+j\omega/\omega_2} \quad (1)$$

式中: $\alpha = (R_1 + R_2)/R_2$; $\omega_1 = 1/R_1C_1$; $\omega_2 = (R_1 + R_2)/R_1R_2C_1$, ω_1 和 ω_2 分别对应图 4(b)所示两个转折频率。选择不同的 R_1, R_2 和 C_1 参数,输出端 V_{out} 的频率响应也不同,图 5 为不同参数下输出端的频率响应曲线。可以看出,在 R_1 和 R_2 参数固定时,调整电容 C_1 可以改变电路对各频率的补偿强度。

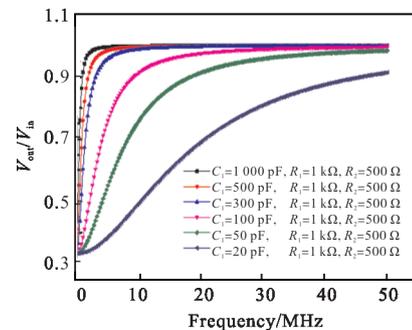


图 5 不同 RC 参数下均衡电路频率响应

Fig.5 Frequency response of equalization circuit under different RC parameters

在工程设计中,硬件预均衡电路的电阻和电容参数一旦确定,驱动电路的频率响应就得到确定,从而对 LED 频率响应的补偿程度也就不会改变。但室

内照明系统需要根据环境光强的变化来实时调节 LED 驱动电流来控制 LED 发光强度,从而使室内光照度保持相对稳定。那么,若在保证均衡效果不受驱动电流的变化影响,就需要保证 LED 的频率响应随驱动电流变化保持相对稳定。因此,在选取室内照明光源时,需要重点考虑驱动电流变化对 LED 频率响应的影响程度。即驱动电流的变化对 LED 频率响应影响越弱,硬件预均衡效果越稳定。

3 驱动电流对 LED 频率特性影响分析

LED 具有普通二极管相似的结构,其等效电路可以用图 6 表示。其中, R_D 和 C 组成的并联网路为 LED 内 PN 结的结电阻和结电容, R_S 和 R_L 分别是 LED 封装中两端金属引脚级连接处的级联电阻和寄生电感。

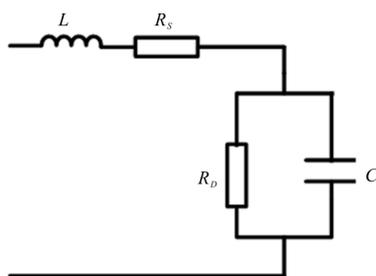


图 6 LED 等效电路

Fig.6 LED equivalent circuit

根据等效电路结构,计算 LED 等效阻抗为:

$$Z(\omega) = j\omega L + R_S + \frac{R_D}{1 + j\omega R_D C} \quad (2)$$

式中: ω 为交流信号角频率。当在低频段时,阻抗主要考虑 R_S 和 R_D 两部分,而在高频时,PN 结 $R_D C$ 网络阻抗作用减弱,LED 的发光功率降低。此外,在自适应照明系统(光强随背景光变化而变化)中需实时调整驱动电流大小,而电流变化将对 LED 中 PN 结等效电阻 R_D 产生影响,从而改变 LED 的频率响应特性^[11]。

为了探究驱动电流的变化对 LED 频率响应的影响程度,使硬件预均衡效果达到最优的目的,文中对可见光通信系统常用的两种白光 LED 光源,即荧光粉 LED 和 RGB-LED 所采用的红、绿、蓝发光芯片进行频率响应测试,分别测量了在 0.1、0.2、0.3、0.4 A 驱动电流下的频率响应曲线,结果如图 7 所示。

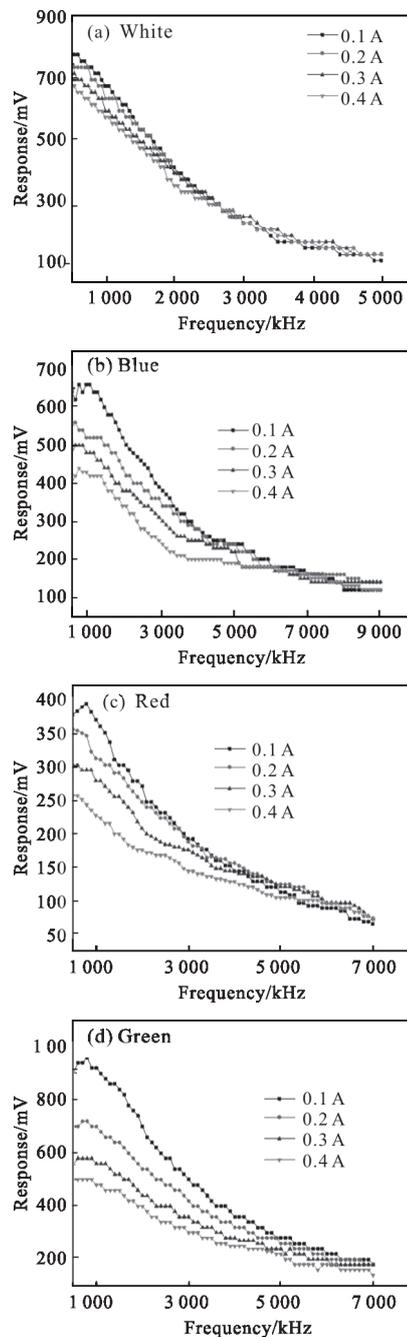


图 7 变驱动电流条件下 LED 频率响应曲线
Fig.7 LED frequency response curve under variable drive current

从图 7 中可以看出:(1)不同驱动电流下,随着正弦交流信号频率的提高,LED 响应强度迅速衰减。其中,蓝、红、绿光 LED 响应强度随驱动电流增大而衰减程度明显,可以看到这三种 LED 各自的四条曲线分布相对白光 LED 稀疏;(2)白光 LED 的频率响应受驱动电流变化的影响不明显,四条曲线分布相对集中,这主要是由于荧光粉 LED 输出的光功率中

荧光分量占据主要成分,以及涂覆在蓝光芯片表面的荧光粉不受电流调制导致的;(3)由于荧光粉 LED 的发光芯片是蓝光芯片,若采用滤光片滤除荧光粉 LED 输出的荧光分量,不仅将导致接收端接收到的光功率衰减,还会在变驱动电流条件下使 LED 频率响应发生较大的变化,影响系统工作稳定性。

为提高硬件预均衡效果的稳定性,降低驱动电流的变化对 LED 频率响应的影响,文中选用荧光粉 LED 作为光强可变的室内 VLC 系统的光源,且接收端部分不使用蓝光滤光片。

4 预均衡电路设计

文中设计的预均衡电路主要由超前校正网络和信号放大电路两部分组成。放大电路主要是调节并放大 LED 两端的交流信号。补偿区间(转折频率点 ω_1 和 ω_2 之间的区域)以及信号放大电路的放大倍数是根据均衡前荧光粉 LED 的频率响应来确定。转折频率 ω_1 和 ω_2 是理论上的近似点,可以大致确定超前校正网络中电阻和电容参数的大小,实际的均衡效果还需要在工程应用中需要进一步调整。

图 8 为硬件预均衡电路的仿真图。该图主要由两部分组成,其中 Net1 为预均衡电路仿真部分,Net2 为荧光粉 LED 频率响应等效电路图。在 Net1 中,与 R_1 、 R_2 和 C_1 组成的超前校正网络级联的 U1 为电流反馈型运算放大器, R_3 和 R_4 控制运算放大器放大倍数。鉴于 Multisim 电路仿真软件器件库中缺少具有频率特性分析的荧光粉白光 LED 的器件模型。文中首先在实验室对 LED 的固有的频率特性进行测量(测量结果见论文第 5 部分的图 12(a)),并在此基础上,采用仿真库中传统的 LED 器件模型和电阻 R_5 构成 Net2,从而实现对荧光粉白光 LED 频率响应曲线的拟合。

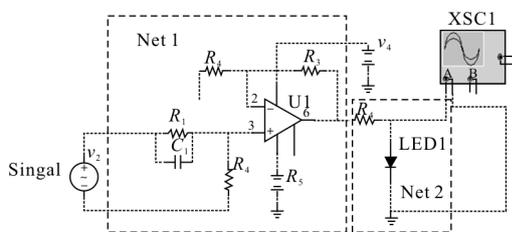


图 8 硬件预均衡电路仿真图

Fig.8 Simulation schematic of hardware pre-equalization circuit

运算放大器的放大倍数计算公式为: $K=1+R_3/R_4$,因此通过控制 R_3 和 R_4 比例,进而调整 LED 的输入电压,从而调整均衡后的 LED 的频率响应强度。不同的放大倍数下均衡电路的频率响应如图 9 所示。

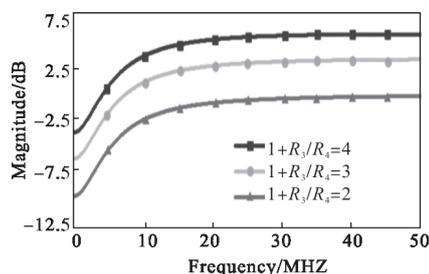


图 9 不同放大倍数预均衡电路频率响应强度

Fig.9 Frequency response intensity of pre-equalization circuit with different magnification

运行 Multisim 中的交流分析功能,得到的频率响应如图 10 所示。

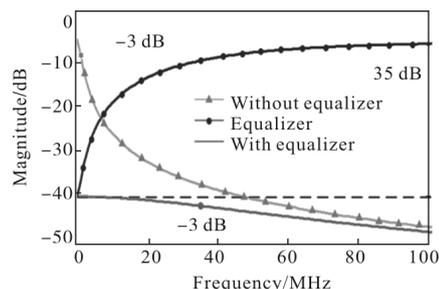


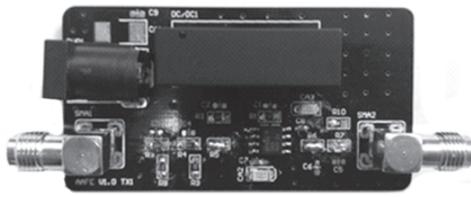
图 10 均衡前后的频率响应曲线

Fig.10 Frequency response curves before and after equalization

其中,由三角形符号代表的曲线为 LED1 两端在没有均衡电路补偿时的固有频率响应曲线,圆点符号代表的曲线为 Net1 预均衡电路频率响应,实心曲线代表的是 LED1 均衡后的频率响应曲线。可以看出,通过硬件预均衡,将 LED1 的 -3 dB 带宽从 1 MHz 提高到 35 MHz。

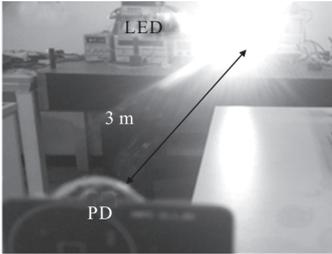
5 实验验证

基于仿真得到预均衡电路各元件参数,通过硬件调试和参数的进一步调整,制作了硬件预均衡电路,通过传输距离为 3 m 的测试平台对预均衡电路性能进行了测试。带有均衡效果的驱动电路模块及测试环境如图 11 所示。



(a) PCB 驱动电路模块

(a) PCB driving circuit module



(b) 测试平台

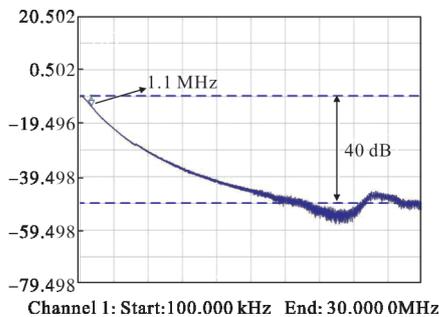
(b) Testing platform

图 11 LED 驱动电路

Fig.11 LED driving circuit

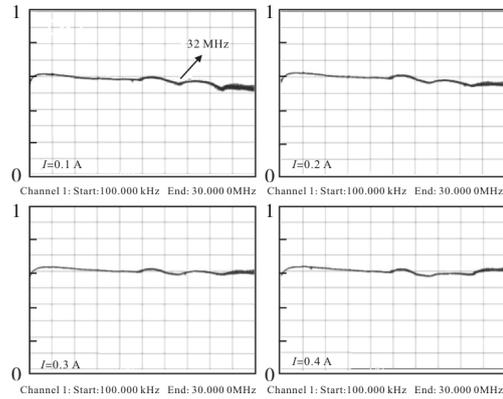
利用矢量网络分析仪在不加入蓝光滤光片的条件下,测试 0.1~0.4 A 驱动电流下单盏功率为 1 W 的荧光粉 LED 所发白光在均衡前后的 -3 dB 调制带宽,测得均衡前后荧光粉 LED 频率响应曲线如图 12(a)、(b)所示。图 12(a)示出,荧光粉白光 LED 的固有带宽为 1.1 MHz,当频率为 30 MHz 时,响应强度衰减了 40 dB,经过均衡电路补偿作用,荧光粉白光 LED 的频率响应曲线变得更加平滑。

从图 12(b)可以看出,驱动电流变化基本不改变均衡效果,均衡后荧光粉 LED 所发白光在 100 kHz~50 MHz 频率范围内的响应较无均衡时更加地平坦,以 100 kHz 作为低频参考点时,-3 dB 调制带宽由无均衡时的 1.1 MHz 左右提高到大约 32 MHz。



(a) 均衡前

(a) Without equalizer



(b) 均衡后

(b) With equalizer

图 12 LED 频率响应

Fig.12 LED frequency response

在 LED 调制带宽得到拓展的基础上,利用误码率测试仪向可见光通信系统发射机注入某一速率的 NRZ-OOK 调制格式的伪随机码信号,该信号经过 LED 电光转换、自由空间、光电探测器光电转换以及接收机后续电路处理后最终恢复成原始 NRZ-OOK 格式伪随机码并进入误码率测试仪,误码率测试仪通过比对发送和接收到的信号是否一致计算该可见光通信系统的误码率。测试结果表明,VLC 系统实现 NRZ-OOK 调制(伪随机码 $2^{23}-1$)下,26 Mbit/s 的传输,误码率 7.55×10^{-6} ,低于前向纠错误码率上限 3.8×10^{-3} 的要求,传输距离达到 3 m,涵盖大部分办公场所天花板至办公桌的距离。

6 结论

文中采用硬件预均衡策略在不采用蓝光滤光片的基础上,直接对单盏 1 W 功率荧光粉 LED 的白光频率响应进行均衡处理,避免了室内变光强应用场景中变化的驱动电流对 LED 频率响应造成的影响,提高了系统的稳定性以及光电探测器接收到的光功率,实现荧光粉 LED 调制带宽由 1 MHz 到 32 MHz 的提升,传输距离达到 3 m,在 NRZ-OOK 调制下实现 26 Mbit/s 的传输。该系统方案省去了蓝光滤光环节,不仅简化了 VLC 系统的硬件复杂度和成本,还很大程度上提高了 VLC 系统的传输距离,满足光强可变的室内 VLC 系统的应用要求。

参考文献:

- [1] Chi Nan, Lu Xingyu, Wang Can, et al. LED-based high-speed visible light communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 030001. (in Chinese)
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于LED的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 030001.
- [2] Zhao Zixu, Song Xiaoqing, Jia Shengjie, et al. Optimization layout of lighting for VLC system in special vehicle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0122001. (in Chinese)
赵梓旭, 宋小庆, 贾胜杰, 等. 特种车内可见光通信系统光源布局优化[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0122001.
- [3] Minh H L, O'Brien D, Faulkner G, et al. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(14): 1243-1245.
- [4] Fujimoto N, Mochizuki H. 477 Mbit/s visible light transmission based on OOK-NRZ modulation using a single commercially available visible LED and a practical LED driver with a pre-emphasis circuit[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2013: 1-3.
- [5] Retamal J R, Oubei H M, Janjua B, et al. 4-Gbit/s visible light communication link based on 16-QAM OFDM transmission over remote phosphor-film converted white light by using blue laser diode [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33656.
- [6] Yeh C H, Chow C W, Liu Y L, et al. Investigation of no analogue-equalization and blue filter for 185Mbps phosphor-LED wireless communication [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015, 47(7): 1991-1997.
- [7] Le-Minh H. 100 Mbit/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21: 1063-1065.
- [8] Yeh C H, Chow C W, Chen H Y, et al. Adaptive 84.44-190 Mbit/s phosphor-LED wireless communication utilizing no blue filter at practical transmission distance.[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9783.
- [9] Chi Nan. LED Visible Light Communication Technologies [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 77-84. (in Chinese)
- [10] Chen Tieniu. Principles of Automatic Control [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)
- [11] Shatalov M, Chitnis A, Koudymov A, et al. Differential carrier lifetime in AlGaIn based multiple quantum well deep UV light emitting diodes at 325 nm [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41: L1146-L1148.