

基于RGB LED可见光通信的实验研究

许笑^{1,2} 陈名松^{1,2} 汤玲利^{1,2}

¹桂林电子科技大学认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室, 广西 桂林 541004

²桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004

摘要 为了实现可见光通信技术照明和通信的双重功能,将脉冲位置调制(PPM)、色移键控调制方式(CSK)与现场可编程门阵列(FPGA)硬件算法相结合,实验验证了所提出的一种基于RGB LED应用的优化型脉冲位置调制方式(RGB CPPM)。对发送端恒流驱动电路、光学天线模块、LED热管理以及接收端各信号处理电路模块进行了设计,搭建了实验系统并进行了测试。通过测试对电路进行验证,分析波形、误码率和照度等实验数据,最后验证了系统的可行性和实用性。

关键词 光通信;可见光通信;RGB LED;现场可编程门阵列;误码率

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.100601

Experimental Study Based On RGB LED Visible Light Communication

Xu Xiao^{1,2} Chen Mingsong^{1,2} Tang Lingli^{1,2}

¹Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing,

Ministry of Education, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

²School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology,

Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract In order to realize the functions of illumination and communication of the visible light communication (VLC) technology, pulse position modulation (PPM), color shift keying (CSK) and hardware algorithm field programmable gate array (FPGA) are combined to verify experimentally the proposed RGB chaotic pulse position modulation (CPPM) based on RGB LED application. The constant current drive circuit at the transmitting terminal, the optical antenna module, LED heat management and each signal-processing circuit module are designed in the system. The circuit performance is verified by testing. The parameters, including waveform, bit error rate (BER), illumination and others, are analyzed. The feasibility and practicability of the system are validated.

Key words optical communications; visible light communication; RGB LED; field programmable gate array; bit error rate

OCIS codes 060.2605; 060.4080; 060.4510

1 引言

2015年3月5日,国务院总理李克强在全国两会的政府工作报告中,提出政府将加大契机发展LED新能源产业以及实施“宽带中国”战略。可见光通信技术(VLC)正是当今通信技术的发展方向。伴随着LED器件的不断发展,加之生产工艺的提高所展现出的高光效、低能耗和低成本,以及不断增大的LED带宽,都奠定了可见光通信技术发展的基础。在应用上,它解决了电磁频谱匮乏的问题,突破了核电、医疗、航空航天等领域通信中电磁受限的使用瓶颈,随着LED光源逐渐取代现有光源广泛分布的趋势,对VLC的研究势在必行。近年来国内外发表的论文多为理论仿真研究,其中关于信道模拟和调试方式的仿真研究^[1]为实验研究提供了理论基

收稿日期: 2015-03-30; 收到修改稿日期: 2015-05-05; 网络出版日期: 2015-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(61077036)、广西科技攻关计划项目(桂科攻 1348014-9)、广西区研究生创新项目(YC-SZ2015145)

作者简介: 许笑(1991—),男,硕士研究生,主要从事光通信系统与技术等方面的研究。E-mail: xxlyg@163.com

导师简介: 陈名松(1967—),男,教授,硕士生导师,主要从事光通信技术、光电子技术和宽带网络方面的研究。

E-mail: cms@guet.edu.cn

础。实验研究中,多使用PC-LED进行实验,2014年,Li等^[2]采用预加重电路使系统的通信速率达到200 Mb/s;同年,Wang等^[3]使用RGB LED进行实验,选用正交频分复用(OFDM)调制使通信速率达到1 Gb/s。在国外,Vucic等^[4]采用离散多音频调制(DMT)方式达到了803 Mb/s的速率。这些研究都获得了良好的成果,但是OFDM、DMT等高速率调制方式的实验要依赖于任意波形发生器(AWG)进行,通过向其导入已用Matlab编译过的高速调制算法,使得AWG能够输出完美波形信号开展实验,但几十万的实验设备和特定的实验条件阻碍了VLC的应用发展。因此区别于以往国内外高昂的实验成本,此次实验以应用为基础,提出并实现基于RGB LED应用的优化型脉冲位置调制(RGB CPPM)硬件调制算法,设计偏向于实用的光学和电路模块,大大降低成本,照度满足照明需要且经调制的速率满足1.5 M宽带的接入要求,完成测试并分析。

2 调制方式的现场可编程门阵列(FPGA)实现

在IEEE 802.15.7标准中提出了一种适用于RGB LED的可见光通信调制方式,色移键控(CSK)调制方式^[5]靠颜色与码元映射进行信道编码,通过数模转换换成不同波长不同功率的光进行传输,因此接收端通过接收并区分不同波长的光功率再进行解码。由于这一调制方式要有极强的色彩校正手段,因此实现困难。于是结合CSK的思想,提出了RGB CPPM调制方式,相对于开关键控(OOK)与脉冲位置调制(PPM)^[6],RGB CPPM有着明显的优势^[7]。

假设比特率为 R_b ,则OOK所需带宽为

$$B_{\text{OOK}} = \frac{1}{T_b} = R_b, \quad (1)$$

当 $M=4$ 时,PPM所需带宽是其时隙带宽 T_s 的倒数:

$$B_{\text{PPM}} = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{MT_b/2^M} = \frac{2^M}{M} R_b = 4R_b, \quad (2)$$

当 $M=4$ 时,由于RGB CPPM 3路并行传输,则所需带宽为

$$B_{\text{CCPM}} = \frac{1}{MT_b/2^{M/2}} = \frac{2^{M/2}}{M} R_b = R_b, \quad (3)$$

当 $M=4$ 时,相对于PPM带宽减少因子 B_r 为

$$B_r = \frac{2^{M/2}}{2^M} = \frac{1}{4}. \quad (4)$$

从(1)~(4)式可以看出,当脉冲持续时间和符号周期相同时,OOK与RGB CPPM信息速率相同,但后者调制方式更适用于无线光通信且PPM调制应用广泛;其次,相比PPM,RGB CPPM每周期可以额外提供2 bit

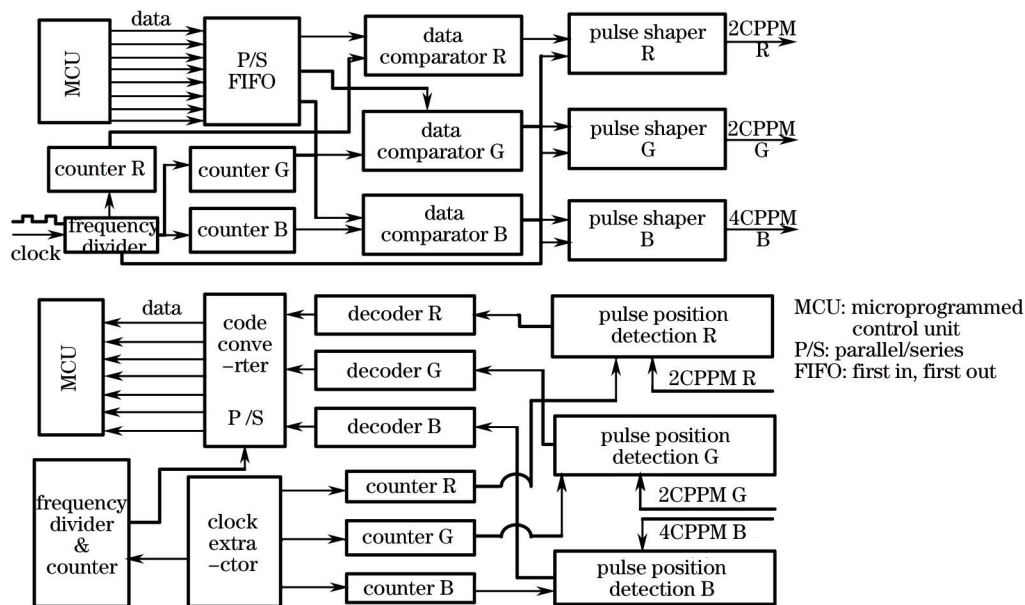


图1 FPGA硬件调制解调结构框图

Fig.1 Block diagram of FPGA hardware modulation and demodulation

信息。当每符号比特数 M 相同(4 bit)时, RGB CPPM 调制带宽与 OOK 相同, 而此时带宽比 PPM 减少了 B_r , B_r 为带宽减少因子。因此使用 Verilog HDL 硬件描述语言将 RGB CPPM 调制算法与 FPGA (EP4CE15F17C8N) 硬件结合进行系统调制, 如图 1 所示。

首先, 信源码通过 FPGA 的输入/输出(I/O)口并行合路, 进行并串变换后 8 bit 组成一帧, 一帧为一个周期, 在每半个周期 FIFO 存储器会将接收完的上半个周期的数据按照 1:1:2 单位码元同时分配给 R、G、B 3 个数据比较器, 时钟由 FPGA 进行分频后分别送入计数器 R、G、B, 数据码元将与其对应时钟信号进行比较, 当两者相对应时, 脉冲宽度成型器则输出对应的 RGB CPPM 信号。FPGA 的解调电路先提取时钟同步信号, 再将时钟同步信号分频送入 3 个计数器得到脉宽时钟信号, 每个时钟信号与各自 RGB CPPM 信号送入对应脉冲位置检测器以确定有无数据信号。有数据脉冲信号时, 解调器对数据解调, 使 3 路信号变为周期相同的码元信号, 最后在码型转换器里串并分路, 并通过 I/O 口并行 8 bit 输出。由于驱动 3 色光源的脉冲宽度可调, 在按照 2R:2G:1B 脉冲宽度^[8]驱动光源合成白光时, RGB LED 有着较高的光效和良好的显色性, 适用于医学等严格的照明环境, 且不同波长的光可以提供良好的通信带宽。码型和调制信号如图 2 所示。按照上述方式调制, 在调制信号中加入了空闲位和时间同步位, 空闲时时间同步信号进行接收端时间校准, 非空闲时时间同步位给予信号一位保护时隙^[9], 可以减弱传输时多径效应造成的影响, 也给接收端电路进行脉冲校正与提取提供了时间和空间。

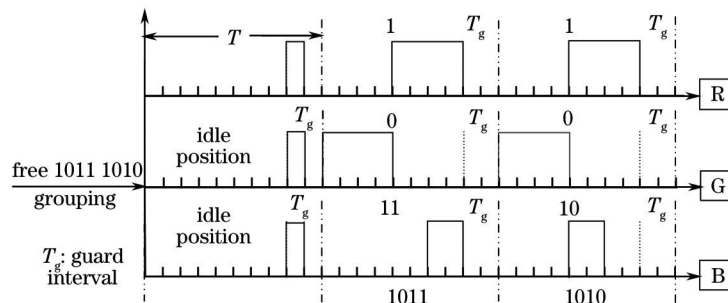


图2 码型分组调制示意波形图

Fig.2 Waveform of code division and modulation

3 VLC 系统设计

实验选用 RGB LED 作为光源、单片机主控、FPGA 进行调制解调, 并设计驱动和信号处理电路模块, 验证了应用于 RGB LED 光源的 RGB CPPM 的调制方式, 组成了一个基于 RGB LED 的可见光通信系统。

3.1 发送电路设计

FPGA 输出的调制信号要进行电/光转换(E/O)来进行光传输, 因此设计光源驱动电路是必要的。国内外大多数实验的驱动电路使用 BIAS-T 模块, 但是其成本很高且可驱动电流较小, 导致实用性很低。与之相比, 为了使光信号有着良好的稳定性, 采用恒流驱动方式, 依托芯片的高可靠性, 使用恒流电源芯片, 让驱动电路更加偏向于可见光通信的实用化。使用 3 片 NU511 芯片分别调制驱动 3 色光源, 驱动电流由外接(REXT)管脚连接电位器来设定, 通过调制信号输入端口(OE)输入已调制信号, out 脚与光源连接, 如图 3 所示, 图中 C 表示电容, R 表示电阻, GND 表示接地。制作印制电路板(PCB)时, 芯片的热处理采用十字花焊盘, 加大接地焊点进行散热^[10]。PCB 采用多点接地, 降低阻抗, 旁路无源器件排列紧凑来降低电磁干扰(EMI)。

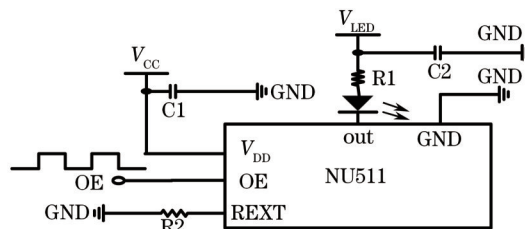


图3 光源调制驱动电路图

Fig.3 Diagram of LED driver circuit

3.2 光源前端的设计

应用于可见光通信的光源既要满足照明要求,还要作为电光信号转变的媒介,因此要选用长寿命、高光效、大带宽、低衰减和快响应的LED芯片。经过筛选使用Cree公司的RGB LED,红光主波长范围为620~630 nm,正向压降为2.2~2.5 V;绿光主波长范围为520~535 nm,正向压降为3.3~3.9 V;蓝光主波长范围为465~485 nm,正向压降为3.1~3.7 V。对于前端的热管理,由于LED芯片焊接在铝制基板上,为了让LED工作在最高效的20℃~30℃的区域,通过热界面材料(TIM)传导到铝制散热器,由于材料的热阻很大程度上取决于厚度,因此选用TIM材料的热传导率为240 W/mK,硬度为肖氏A85,厚度为0.13 mm。最后在散热器上加上风扇,通过辐射、对流和主动冷却的方式将热量散到周围环境空气中。为了提高光能的利用率,使光源的出光方向更加满足照明和通信的双重要求,且避免不必要的投射造成浪费,需进行二次光学设计。光学前端设计使用聚光透镜进行聚光发射,透镜半径为35 mm,经透镜收束后的发散角约为60°。

3.3 接收前端设计

带有数据的光信号经过无线信道传输后,在接收前端就要对各波长的光信号进行处理。在背景光噪声下,加之长距离传输后光信号的衰减,要使用3个透镜对光信号进行会聚,透镜为焦距100 mm的未镀膜双凸透镜。由于运用波分复用(WDM),3路信号分布在各自的3色光里,因此使用滤光片来选出3个波长的信号,滤光片的使用大大降低了信号的串扰,所选用的滤波片中心波长为470、532、630 nm,半峰全宽为20、10、20 nm,峰值透射率最小为70%。光电探测器选择Si-PIN(HAMAMATSU S6968)。

3.4 接收电路设计

对于处理弱电流信号的前置放大器,采用了跨阻放大器(TIA)。TIA采用高速、高输入阻抗和低噪声的OPA4354运放芯片。在运放间跨接反馈电阻,形成电压并联负反馈,有较大的动态范围和较宽的带宽。采用两级级联放大使得增益稳定。为了使接收端适应距离的变化,适应动态变化的接收光强,在电路中加入采用TL026芯片搭建的自动增益控制电路(AGC)^[11],让接收端在通信距离、接收角度等变化时有良好的信号恢复能力。对于前级引入的噪声信号,为了使解调不受干扰,设计了有源滤波模块,该电路让信号在通带内放大增益不变,信号不衰减,且电路参数不会随负载变化。最后,信号经过限幅放大器(OPA354)对波形过饱和和放大形成数字信号,并传输至FPGA电路进行信号的解调。

4 实验测试及分析

由各模块搭建好系统进行测试,如图4所示。首先对驱动和收端信号处理电路及光学部分进行测试,利用函数信号发生器产生占空比为50%的1 MHz的方波,可看做0、1交替的非归零二进制-开关键控(NRZ-OOK)信号,将其同时送入3路LED驱动电路的OE端,3色LED芯片独立供电,红光LED正向偏执电压为2.3 V,绿、蓝光为3.3 V,且分别将恒流驱动电流调至110 mA,信道距离为0.5 m。使用示波器观察发送OE端和接收端限幅放大后的3路信号,如图5所示,测得收发端的整体时延为160 ns。因此系统每路完全可以传输信息速率为1 Mb/s的NRZ-OOK信号,系统3路即可实现3 Mb/s的通信速率。

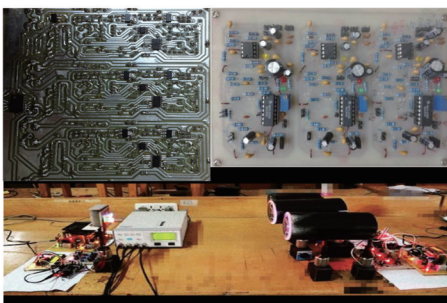


图4 收发电路及实验测试图

Fig.4 Diagram of transceiver circuit and experiment

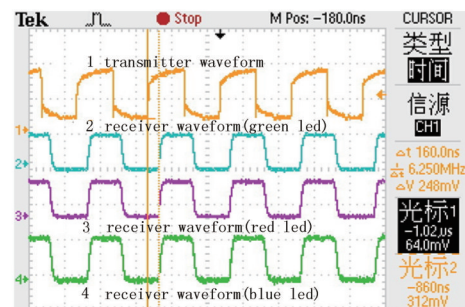


图5 传输1 MHz信号发送和接收端波形

Fig.5 1 MHz waveforms of signals in the transmitter and the receiver

进行系统的测试,连接单片机主控、FPGA和收发电路模块。单片机产生码元至FPGA调制,光调制后的3色光空间耦合后混合成白光,实验测试的通信距离为100 cm,在接收端限幅放大后的信号如图6所示,

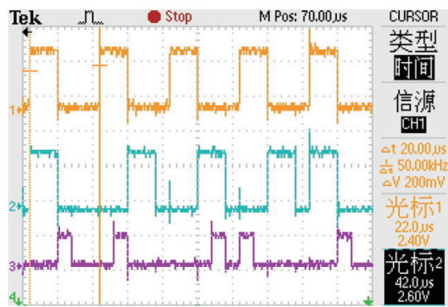


图6 RGB CPM调制传输后限幅放大波形图

Fig.6 Waveforms of signals via limiting amplifier

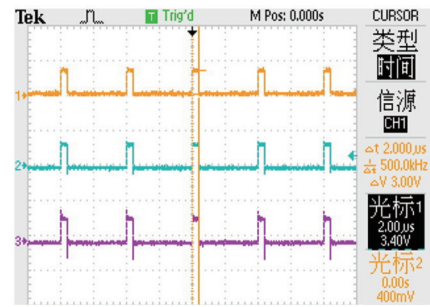


图7 限幅放大后的空闲信号波形图

Fig.7 Waveforms of idling signals via limiting amplifier

码元为01010010;当无信号传输只有空闲信号时,接收端信号如图7所示,此时示波器可以清楚看到时钟同步信号,调制后可实现200 kb/s的通信速率。

由于系统的性能决定着传输信号的质量,眼图可以判断系统电路的性能,3色光的眼图如图8所示。可以看出眼图“张开”得较大,且相互之间无交叠现象,说明系统具有较好通信能力,图8可分别看到示波器的标尺值,能清晰看到3路信号的脉宽。

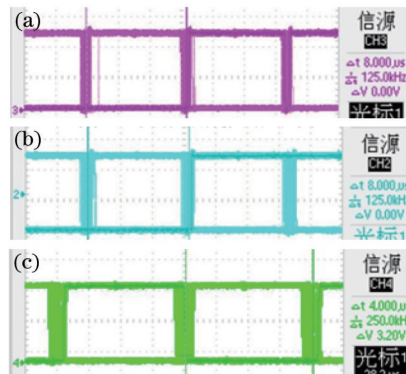


图8 接收端测得3路眼图波形图。(a) 红光;(b) 绿光;(c) 蓝光

Fig.8 Limiting amplifier waveforms of the receiver. (a) Red led; (b) green led; (c) blue led

最后进行系统的误码测试。在通信信道各种噪声的影响下,误码可以客观地反应出系统整体性能,特别是其可靠性。由于传输数据时,红光和绿光2路单位信号脉冲宽度为8 μs,而蓝光信号为4 μs,空闲时隙均为2 μs,因此使用误码测试仪(AV5233C)产生62.5 kb/s的归零(RZ)码信号(周期为16 μs)分别送入红光和绿光驱动电路的OE端;再用误码测试仪产生125 kb/s的RZ码信号(周期为4 μs)输出至蓝光恒流驱动电路的OE端。3路测试结果如表1所示,可以看出3种不同波长的光随收发端距离的增加,误码率也逐渐增加,在误码率(BER)约为 10^{-6} 时,红光、蓝光、绿光的最大通信距离分别为100、70、60 cm。调节驱动电流,使得照度相同时,绿光的误码率是最大的。

表1 系统误码率

Table 1 Sytem BER

Distance /cm	Bit error rate		
	Red LED	Green LED	Blue LED
50	0	1.4×10^{-6}	0
55	0	3.58×10^{-6}	9.33×10^{-7}
60	4.44×10^{-8}	5.27×10^{-6}	8.07×10^{-6}
65	3.78×10^{-7}	2.08×10^{-5}	7.8×10^{-6}
70	1.4×10^{-6}	4.68×10^{-5}	1.48×10^{-5}
75	1.82×10^{-6}	6.26×10^{-5}	1.94×10^{-5}
80	2.2×10^{-6}	8.98×10^{-5}	2.4×10^{-5}
85	2.62×10^{-6}	1.38×10^{-4}	2.98×10^{-5}
90	3.18×10^{-6}	2.47×10^{-4}	3.34×10^{-5}
95	5.98×10^{-6}	4.5×10^{-4}	3.5×10^{-5}
100	6.47×10^{-6}	1.03×10^{-3}	3.7×10^{-5}

对照度测试的实验数据用 Matlab 拟合,结果如图 9 所示,在等距离系统的条件下,绿光的光照度明显小于红光和蓝光;当加上滤光片时,接收机接收到的光强变弱,且不同波长光的传输距离都有所减少。由于 LED 芯片有着工艺的不均匀性,导致实际光效也不同,因此照度的测试结果也为驱动恒流电流的调整提供了技术指标。

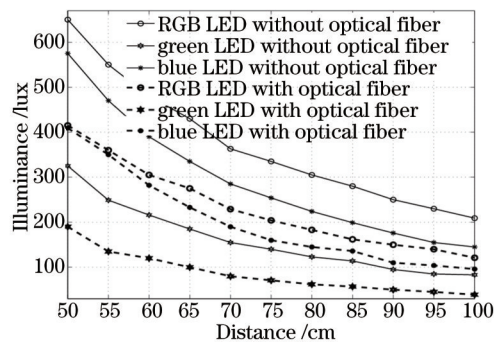


图 9 通信距离与光照度实验数据图

Fig.9 Relationship diagram of communication distance and illuminance

实验数据看出,发光功率的大小影响着通信距离和照明质量,在接收端所接收混合着背景光噪声的光信号强弱直接导致误码率的大小,滤光片的透射率、光学天线准直及会聚的效果也直接影响误码率,而且信道对 3 色波长的光衰减不同导致接收信号强度各不相同,也会造成不同的误码率。因此 RGB LED 以通信距离为代价换取系统的可靠性及照明要求,但是基于波分复用(WDM)技术可以提高信道的通信容量^[12]和系统总的传输率,数据及分析也为下一步研究提供了方向和依据。

5 结 论

照明和通信为可见光通信之本,有效性和可靠性亦是衡量通信系统重要的指标。本文主要对 RGB CPPM 调制算法的 FPGA 实现、收发端光学模块及各硬件电路模块的设计进行阐述,并搭建各硬件模块进行测试。波形图反映出驱动电路的最大调制速率实现了 RGB CPPM 调制算法,眼图可以反映出光电接收系统的良好性能,照度的测试表明光源可以在满足通信的基础上达到照明的效果,而误码的测试图则可看出整个系统有着良好的可靠性。这些数据也为下一步理论和工程研究提供了依据,下一步将对前向纠错码(FEC)进行研究以降低误码率,对光学天线以及驱动电路进行改进来达到更远的通信距离和更大的驱动电流。本设计较为完整地展现了一个基于照明与通信为一体的可见光通信系统,更进一步增加了 VLC 的实用性。但完善这一系统研究,还有许多关键技术,对于热门的可见光通信的技术研究,依然存在许多挑战。

参 考 文 献

- 1 Liu Yang, Zhang Guoan. Study on modulation scheme of visible light communications and its performance[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090601.
刘 洋, 章国安. 可见光通信调制方式及其性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090601.
- 2 Honglei Li, Xiongbin Chen, Junqing Guo, *et al.*. 200 Mb/s visible optical wireless transmission based on NRZ-OOK modulation of phosphorescent white LED and a pre-emphasis circuit[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(10): 100604.
- 3 Wang Yuanquan, Chi Nan. A high-speed Bi-directional visible light communication system based on RGB-LED[J]. China Communications, 2014, 11(3): 40-44.
- 4 Vucic J, Kottke C, Habel K, *et al.*. 803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary[C]. Conference on Optical Fiber Communication (OFC)/National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), 2011: OWB6.
- 5 Rajagopal S, Roberts R D, Lim Sang-Kyu. IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 72-82.
- 6 Poppala W O, Poves E, Hass H. Spatial pulse position modulation for optical communications[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(18): 2948-2954.
- 7 Tang Lingli, Chen Mingsong, Wang Yonghui. Simulation study modulation technology based on RGB LED[J]. Optical

- Communication Technology, 2014, 38(2): 60–62.
- 汤玲利, 陈名松, 汪永辉. 基于 RGB LED 调制技术仿真研究[J]. 光通信技术, 2014, 38(2): 60–62.
- 8 Muthu S, Gaines J. Red, green and blue LED based white light source: Implementation challenges and control design [C]. 38th Annual Conference of IEEE Industry Applications Society, 2003: 515–522.
- 9 Samir Palnitkar. Digital Design with Verilog HDL Synthesis[M]. Xia Yuwen, Hu Yanxiang, Diao Lansong, Transl, Beijing: Electronic Industry Press, 2009.
- Samir Palnitkar. Verilog HDL 数字设计与综合[M]. 夏宇闻, 胡燕祥, 刁岚松, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- 10 Li Xu. Research on Active Harmonic Suppression in Electronic Systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 89–90.
- 李 旭. 电子系统中的有源谐波抑制技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 89–90.
- 11 Gu Yuanpei, He Ning, He Zhiyi. Research on mobile electronic guide system based on lighting LED optical communication [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060602.
- 顾元培, 何 宁, 何志毅. 基于 LED 光通信的移动电子导览系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060602.
- 12 Li Rongling, Shang Huiliang, Lei Yu, *et al.*. Research of key enabling technologies for high-speed visible-light communication[J]. Laser and 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究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050003.

栏目编辑: 王晓琰