

多波长可见光双二进制信号传输性能的研究

周 越, 邵宇丰, 汪志锋, 李长祥

(上海第二工业大学计算机与信息工程学院, 上海 201209)

摘 要: 搭建了多波长 LED 可见光通信 (Visible Light Communication, VLC) 系统, 采用了低通滤波器 - 光双二进制 (Low Pass Filter-Optical Duobinary, LDF-ODB) 的调制方案, 实现了波长为 450 nm、550 nm 和 650 nm 的可见光信号 10 m 的传输距离, 并分析了 3 种可见光信号的传输性能。仿真结果证明了光双二进制调制与解调技术应用于可见光通信系统的可行性。通过比较不同波长 VLC 系统的 Q 值、眼图、接收灵敏度等, 结果证明: 采用 450 nm 波长收发信号的方案, 其接收灵敏度高于应用其余波长的系统; 采用 550 nm 波长收发信号的方案具有最小的接收功率代价值。因此, 在实际应用中, 当系统接收灵敏度要求较高时, 采用 450 nm 波长收发信号的方案具有优势; 若同时兼顾接收功率代价值的影响, 建议选择采用 550 nm 波长收发信号的方案。上述研究结果为 VLC 系统的调制、解调和多波长的实际应用提供了可参考方案。

关键词: 可见光通信; 光双二进制; 多波长; 接收灵敏度; 接收功率代价值

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

0 引言

可见光通信 (Visible Light Communication, VLC) 是一种短距离的无线光通信技术, 被公认为具有绿色照明和数据通信的双重作用^[1], 因此广受学术界关注。VLC 基于波长范围为 380 ~ 780 nm 的 LED 实现无线光通信, 在上述波长范围内 LED 的响应灵敏度非常高, 且具有良好的线性调制特性, 因此能够实现数据传输^[2-3]。VLC 与传统无线通信技术相比 (如射频 (RF-ID)、蓝牙 (Bluetooth)、超宽带 (UWB, Ultra Wide Band) 及无线相容性认证 (Wi-Fi)), 具备支持高速数据传输、不占用射频通信频段、易于搭建系统、无需频谱使用许可证等优点^[4-6]。目前, 光双二进制调制解调技术由于具有很好的抗色散性能、实现技术简单且具有较高的频谱利用率等优点, 故受到广泛关注并在常规光纤通信系统中得以应用^[7]。但通过调研文献后发现, 光双二进制的调制、解调技术还未在 VLC 系统中得到应用。考虑到光双二进制信号具有部分响应信号 (Partial Response Signal) 的特点 (根据 Nyquist 第二准则^[8]), 在理论

上具有较好的收发特性, 因此, 本文在 VLC 系统中开展了相关应用研究。

1 VLC 系统分析

图 1 为基于 LED 的 VLC 系统框图, 该系统包括发送机、可见光信道和接收机 3 部分。发送机将原始的二进制比特流经过预处理和编码调制, 编码调制的目的是为了在有限的带宽上实现更高的传输

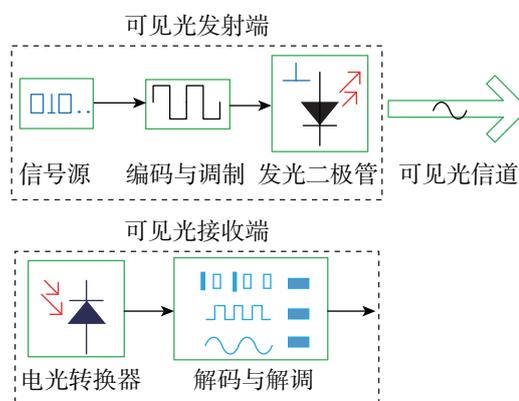


图 1 VLC 系统的组成及工作原理
Fig. 1 Configuration and principle of the used VLC system

收稿日期: 2017-02-27

通信作者: 邵宇丰 (1977-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士后, 主要研究方向为环境监测技术、通信与信息系统、信号与信息处理。E-mail: yfshao@sspu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (6117064), 上海市教委科研创新项目 (15ZZ101), 上海第二工业大学重点学科 (XXKZD1605), 上海第二工业大学内涵建设项目 (A11NH170301) 资助

速率^[9]。调制后生成的电信号输入白光 LED 发送模块,进行直接电光调制,并生成待传输的光信号。该信号经可见光信道传输后输入接收机模块,采用光电二极管实现直接检测,最终经过解调得到原始电信号。为提高 VLC 系统的传输速率和频谱效率,可在发射机中使用高阶调制和编码技术,并在接收机中使用高阶解调和解码技术。

由于 VLC 系统的载波是可见光,容易受到外界环境光噪声源干扰(如阳光、白炽灯和荧光灯等)^[10],从而导致接收机接收到载有信息的光能量比例减小,信息传输的可靠性降低。VLC 系统中的信道传输通常分为视距(Line of Sight, LOS)传输和非视距(None Line of Sight, NLOS)传输^[11]。在 LOS 情况下,接收功率为^[12]:

$$P_{rLOS} = H_{LOS}(0)p_t \quad (1)$$

在 NLOS 情况下,接收功率通常由 LOS 上的信道 DC 增益给出,并且反射路径 $H_{ref}(0)$ 为:

$$P_r = H_{LOS}(0)p_t + H_{NLOS}(0)p_t = H_{LOS}(0)p_t + \sum \text{ref} H_{ref}(0)p_t \quad (2)$$

可见光信道模型建模时应当考虑噪声的影响,因此设计过程包含加性高斯白噪声(AWGN)的无线 VLC 传输信道,

$$I(t) = \eta p_i(t) \otimes h(t) + N(t) \quad (3)$$

式中, $I(t)$ 为光电探测器的电流; η 为光电探测器的灵敏度; $h(t)$ 为脉冲响应; $N(t)$ 为加性高斯白噪声。

本文基于无线 VLC 传输信道并引入高斯白噪声来建模(信号的空间无线传输距离为 10 m)。

2 系统仿真和结果分析

本文采用 Optiwave 光通信软件和 MATLAB 联合建模搭建了 VLC 系统。仿真实验系统的速率设置为 10 Mbit/s,采用强度调制/直接检测(IM/DD)的方式。发射端包括 ODB 发射机,在 ODB 发射机内,产生的伪随机序列需要进行差分调制,由于光双二进制调制具有一种部分响应调制的特性,故需要首先进行预编码以防止误码的传播。实验通过使用异或门和延迟器^[13]来实现差分预编码。随后通过截止频率数值为 0.28 倍比特率的低通滤波器,滤除低频信号分量来代替延时相加单元,从而实现了电双二进制的调制。最终双二进制调制信号直接驱动 LED 模块产生随光载波强度变化的光信号,进入可见光信道中传输。设置 LED 的波长分别为 450 nm(蓝光)、550 nm(绿光)、650 nm(红光),发射功率为 500 mW。在可见光传输信道中,发射和接收孔径直径分别设为 0.8 cm 和 1 cm,衰减参数设置为 5 dB/km。接收端主要由光学滤波器、光电探测器、低通滤波器和 3R 再生器组成,如图 2 所示。到达接收端的光信号首先进入矩形光滤波器滤除其余波段的光噪声;然后信号进入 APD 雪崩光电二极管进行光电转换,其响应度为 0.9 A/W,暗电流为 10 nA;接着再通过低通滤波器,其截止频率的数值为 0.75 倍比特率;最后使用 3R 再生器进行信号的恢复。

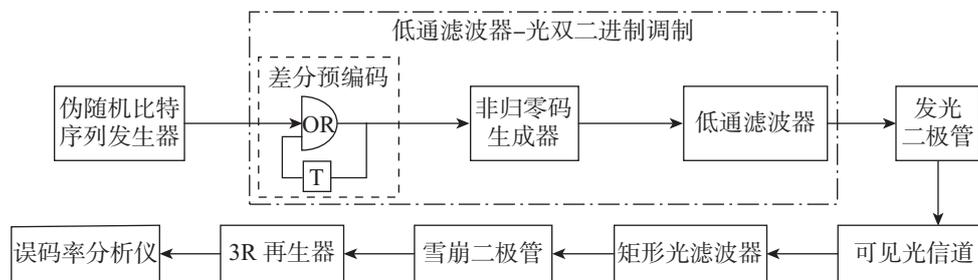


图 2 VLC 系统框图

Fig. 2 Block diagram of VLC system

采用不同波长(450 nm、550 nm、650 nm) VLC 系统的频谱图和传输眼图如图 3 所示。对比 3 种波长的传输后的频谱图,采用 450 nm 波长系统的频谱在 0 频处最高接收功率略大于其余 2 种波长,整体

频域上功率的衰减也较为平缓。通过比较图 3 的 3 种波长的眼图发现:450 nm 波长眼图的眼开度略大于其余的波长,反映了抗码间串扰能力较强,这也说明了不同波长的可见光信号传输性能的差异。通过

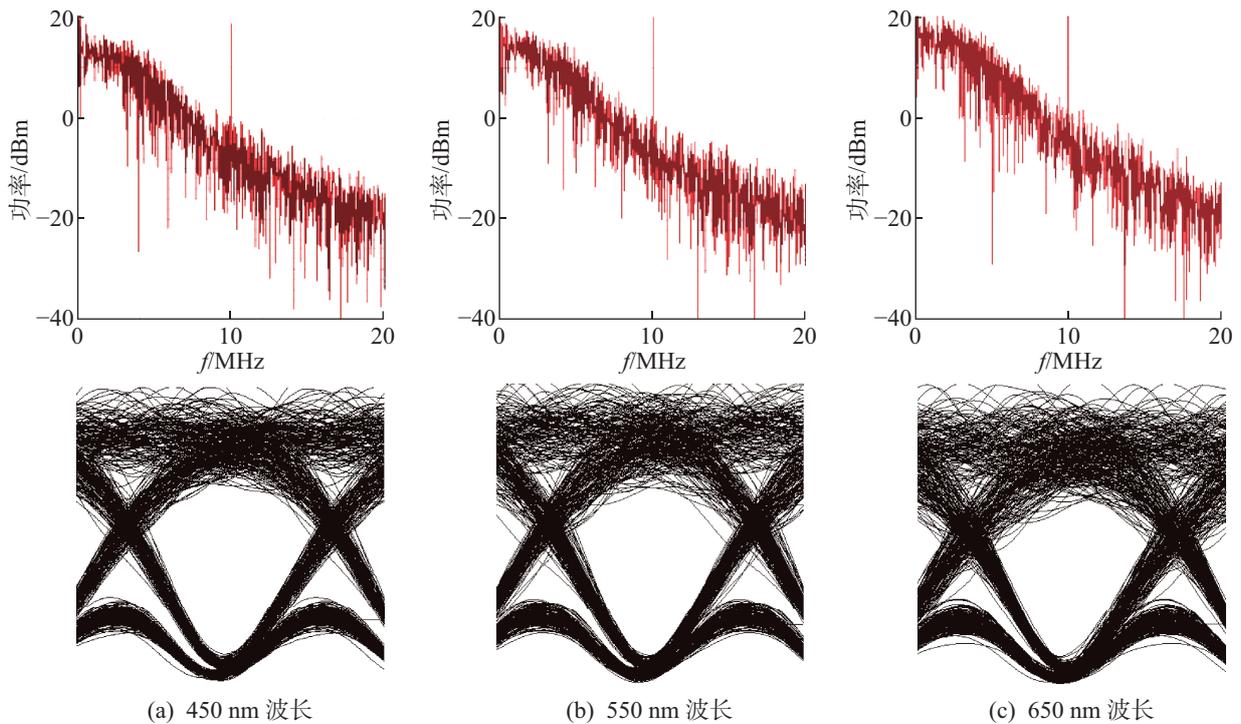


图 3 采用不同波长 VLC 系统的频谱图与眼图
 Fig. 3 Frequency spectrum and eye diagrams of different wavelengths VLC signals

误码率分析仪得到具体数据: 采用 450 nm 波长信号的 VLC 系统, 在最佳判决门限为 0.51 个周期时, 测得最大 Q 值为 10.7; 采用 550 nm 波长信号的 VLC 系统, 在最佳判决门限为 0.49 个周期时, 取得最大 Q 值为 9.4; 采用 650 nm 波长信号的 VLC 系统, 在最佳判决门限为 0.52 个周期时, 取得最大 Q 值为 7.9。通过分析和比较, 证明采用 450 nm 波长信号的系统具有最大 Q 值, 因此具有最好的传输性能。

为了比较研究出不同接收功率 (Received Power) 下的误码率, 采用 3 种不同波长 VLC 系统的接收功率与误码率如图 4 所示。为了比较不同波长系统的接收功率代价, 加入了传输前后的接收功率

与误码率图像进行分析比较。根据 BER 为 10^{-9} 作为系统最大容限边界条件^[14], 通过对采用 3 种波长系统的接收功率进行分析发现: 采用波长为 450 nm 方案, 在传输前后的接收功率分别为 -37.38 dBm 和 -36.88 dBm, 其中接收功率代价为 0.5 dB, 如图 4(a) 所示; 采用波长为 550 nm 方案, 在传输前后的接收功率分别为 -36.85 dBm 和 -36.43 dBm, 接收功率代价为 0.42 dB, 如图 4(b) 所示; 采用波长为 650 nm 方案, 在传输前后的接收功率分别为 -36.76 dBm 和 -36.04 dBm, 接收功率代价为 0.72 dB, 如图 4(c) 所示。上述结果证明: 采用 450 nm 波长信号传输时的接收灵敏度均为最大; 但是对于接收功率代价值而

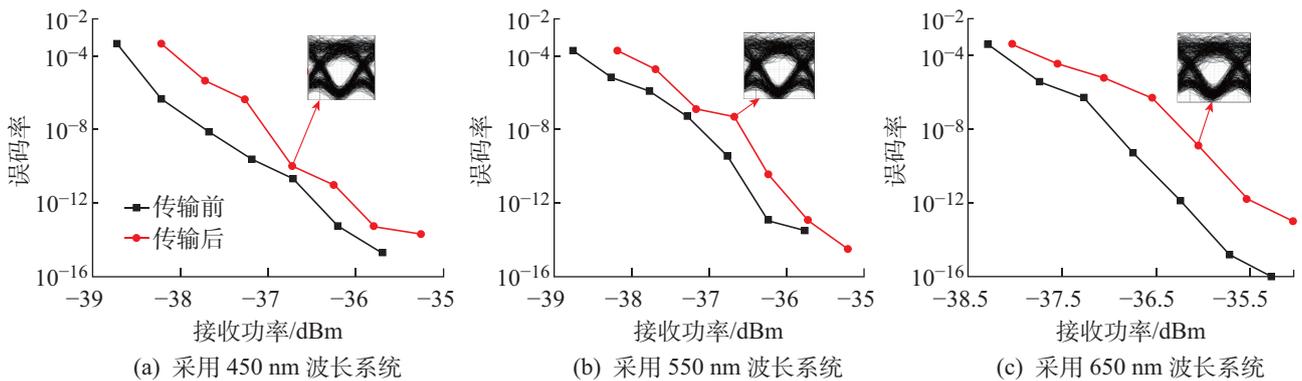


图 4 采用 3 种不同波长 VLC 信号的接收功率与误码率
 Fig. 4 Received power and BER of three different wavelengths VLC signals

言,采用 550 nm 波长信号传输时的代价最小。因此在实际应用中,当系统接收灵敏度要求较高时,建议选择采用 450 nm 波长收发信号的方案具有一定的优势;但如果兼顾接收功率代价的影响,建议选择采用 550 nm 波长收发信号的方案。

3 结 语

本文搭建了基于 LED 的多波长 VLC 系统,采用了低通滤波器 - 光双二进制 (LDF-ODB) 的调制方案,实现了波长为 450 nm、550 nm 和 650 nm 的可见光信号 10 m 的收发。通过比较上述不同波长可见光信号的接收误码率、眼图、接收灵敏度等结果,证明了采用 450 nm 波长的可见光信号传输时系统的接收灵敏度优于其他波长的光信号,但是其接收功率代价值却高于采用 550 nm 波长传输的光信号。因此当系统接收灵敏度要求较高时,采用 450 nm 波长收发信号的方案较好;但若考虑接收功率代价值的影响,则采用 550 nm 波长收发信号的方案较优。上述研究结果为 VLC 系统的调制解调方法和多波长的实际应用提供了可参考方案。

参考文献:

- [1] KARUNATILAKA D, ZAFAR F, KALAVALLY V, et al. LED based indoor visible light communications: State of the art [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [2] HUANG X, WANG Z, SHI J, et al. 1.6 Gb/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22034-22042.
- [3] DO T H, HWANG J, YOO M, et al. Analysis is of the effects of LED direction on the performance of visible light communication system [J]. *Photonic Network Communications*, 2013, 25(1): 60-72.
- [4] LEE K, PARK H, BARRY J R. Indoor channel characteristics for visible light communications [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(2): 217-219.
- [5] BAYAKI E, SCHOBBER R. On space-time coding for free-space optical systems communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(1): 58-62.
- [6] ITOH S, TAKAI I, SARKER M S Z, et al. A CMOS image sensor for 10 Mb/s 70 m-range LED-based spatial optical communication [C]//*Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*, Toronto, Canada: IEEE, 2010: 402-403.
- [7] 卢智嘉, 王现彬, 李莉, 等. 高速光纤系统中光双二进制传输性能分析 [J]. *光通信技术*, 2015, 39(2): 34-37.
- [8] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理 [M]. 7 版. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [9] 邵宇丰, 陈林, 文双春, 等. 新型改进光双二进制传输的编解码方案 [J]. *通信学报*, 2007, 28(2): 58-63.
- [10] 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): 40-50.
- [11] CHANG C C, SU Y J, KUOKAWA U, et al. Interference rejection using filter-based sensor array in VLC systems [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5): 1025-1032.
- [12] GROBE L, PARASKEVOPOULOS A, HILT J, et al. High-speed visible light communication systems [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(12): 60-66.
- [13] SINDHUBALA K, VIJAYALAKSHMI B. Design and performance analysis of visible light communication system through simulation [C]//*Computing and Communications Technologies (ICCCCT)*, Santa Clara, CA, USA: IEEE, 2015: 215-220.
- [14] ZHOU Y, SHAO Y, WANG Z, et al. Research on dispersion compensation of 40 Gb/s optical duo-binary coded transmission system [J]. *Optics and Photonics Journal*, 2016, 6(8): 190-195.

Research on Transmission Performance of Optical Duobinary Multi-Wavelength Visible Light Signals

ZHOU Yue, SHAO Yufeng, WANG Zhifeng, LI Changxiang

(College of Computer and Information Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: A multi-wavelength LED visible light communication (VLC) system was set up. The low pass filter optical duobinary (LDF-ODB) modulation scheme was used to realize three different visible light signals (the wavelengths were 450 nm, 550 nm and 650 nm) transmission over 10 meters respectively, and the transmission performance of three kinds of visible light signals was analyzed. The

simulation results showed the feasibility of optical duobinary modulation and demodulation technology in the VLC system. By comparing the Q value, eye diagrams and receiver sensitivities, it was found that the receiver sensitivity was better when transmitting optical signal was 450 nm. And, the system had the lowest receiver power penalty when 550 nm wavelength transceiver was used. Therefore, in the practical application, when the system has a higher sensitivity requirement, the transceiver with 450 nm wavelength signal is the best. As taking into account the receiver power penalty, the transceiver with 550 nm wavelength signal is better than others. The above results provide a reference for the modulation, demodulation and multi-wavelength applications in VLC system.

Keywords: visible light communication (VLC); optical duobinary; multi-wavelength; receiver sensitivities; receiver power penalty

简 讯

上海第二工业大学 2017 教育教学工作会议召开

2017年5月5日,上海第二工业大学2017教育教学工作会议召开。会议的主题为迎评促建、改进提高、彰显特色,中心任务是进一步推进本科教学审核评估。校领导宋宝儒、俞涛、邹龙飞、徐余法、谢华清、徐玉芳及全体中层干部、教师和辅导员代表参会。会议由谢华清副校长主持。

俞涛校长作了题为“全力以赴、众志成城,以本科教学审核评估为契机,推动学校改革发展”的报告。报告总结了2016~2017学年上海第二工业大学教育教学工作取得的成绩及存在的问题,重点就本科教学审核评估、学校改革发展做了再动员、再部署。对进一步做好审核评估工作提出了要求,要求全体教职员要以饱满的热情、强烈的责任感和使命感投入到这项工作中来,要求从思想上高度重视、凝心聚力,要求尊重规律、更新观念,要求部门间协同配合、众志成城,圆满完成审核评估各项任务。

宋宝儒书记对前一阶段推进审核评估的各项工作给予肯定,强调此次会议的任务是对评估工作进行再动员、再推进。各项工作要统筹兼顾,把当前的评估工作和教育综合改革、贯彻落实中央31号文件精神的工作有机结合起来。要对前期本科专业评估专家提出的问题认真整改,有关部门要下达责任清单,明确目标任务、责任部门和时间节点。学校要将审核评估工作纳入考核范围,明确奖惩。宋书记号召全体教职员以高度的责任感和主人翁意识,投入本科教学审核评估和教育教学改革发展中,希望在党政领导、全体教职员共同努力下圆满完成工作任务。

相关职能处室及二级教学单位负责人、教授代表分别做了大会发言,报告了各自学部(院)推进本科教学审核评估、开展教育教学改革等工作情况。