

基于FPGA的室内可见光通信系统设计与实现

王一帆, 魏同成*, 张博祯, 张迎翔, 杜勇

(新疆师范大学 物理与电子工程学院 新疆发光矿物与光功能材料研究重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 可见光通信(Visible Light Communication, VLC)具有通信速率高、绿色环保、安全性高、无需频谱许可等优点, 已经成为目前的研究热点。针对可见光通信系统设计复杂及系统通信距离短的问题, 文章在接收端加入二级放大电路, 进一步改善系统抗干扰能力, 同时还研究了室内可见光通信系统的信道模型, 并结合高亮发光二极管在室内空间进行了光照强度、接收功率、信噪比及误码率的仿真分析, 分析了不同调制方式的抗噪声性能及带宽利用率。将数字信号处理器 FPGA(Field Programmable Gate Array, FPGA)作为光通信系统的控制芯片, 设计了基于2PPM(Pulse-Phase Modulation, PPM)调制的室内可见光通信系统, 通过搭建实验平台验证了该方案下的系统通信性能, 在通信距离为3.5m时, 误码率小于 1×10^{-5} , 实验结果表明该通信系统具有误码率低、结构简单等优点, 满足高性能室内可见光通信系统的要求。

关键词: 现场可编程门阵列; 脉冲位置调制; 室内可见光通信; 二级放大电路

中图分类号: TN914.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-9659(2024)03-0021-10

相较于普通白炽灯, 发光二极管(Light Emitting Diode, LED)光源在同等亮度下可以节省大量能源^[1-3]。LED光源具有照明和通信双重功能, 其调制带宽理论上可以达到几百太赫兹, 目前基于LED的可见光通信已经成为研究热点^[4-7]。随着无线应用的发展, 传统射频通信已经无法满足高速无线数据传输的需求。可见光通信具有频带资源丰富、无需频率许可、通信安全性高、绿色环保、无电磁干扰等优点^[8-9], 虽然前景广阔, 但在商用白光LED的带宽限制下实现高速数据通信也并非易事, 同时可见光通信易受障碍物的遮挡, 这也是限制可见光通信的主要原因^[10]。

为了支持可见光通信高速传输, Huang等人提出了一种用于高速可见光通信系统的级联幅度均衡器^[11]。通过级联预均衡电路, 使用市场售卖的磷白光LED、蓝色滤波器和差分输出PIN(Pinnacle Scientific Limited, PIN)接收器, VLC系统的-3dB带宽可以从17MHz扩展到366MHz。数据速率为1.60Gbit/s, 利用16QAM-OFDM(Quadrature Amplitude Modulation-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, QAM-OFDM)调制方式, 在预前向纠错(Pre-FEC Bit Error Rate, PRE-FEC)限制为 3.8×10^{-3} 的情况下, 在1m自由空间具有400MHz调制带宽。Aboagye等人探讨了使用智能反射表面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)来解决室内可见光通信中视距链路阻塞问题, 考虑了用户的实际使用需求^[12], 例如随机接收器方向以及通信链路存在障碍物的情况, 提出了反射表面辅助的室内可见光通信系统模型, 考虑了最大速率及最大方向等问题。Khalifeh等人研究了LED分布对不同大小房间的影响, 设计了可见光通信系统并利用精确的光线追踪算法建模通信系统^[13], 经过验证, 该系统满足国际照明组织对于室内光强及误码率要求, 利用该系统进行了视频信号的传输。上述研究分别对室内可见光通信系统调制带宽及速率进行了研究, 解决了LED带宽窄及易受干扰等问题, 但目前室内可见光通信系统若要应用于实际, 仍有一定距离, 同时硬件电路设计较为复杂且成本较高。

针对上述问题, 文章对室内可见光通信系统信道进行建模, 通过室内建模仿真可知, 单个高亮度LED虽

[收稿日期] 2024-01-11

[修回日期] 2024-02-25

[基金项目] 国家级大学生创新创业项目(202310762003); 新疆师范大学优秀青年教师启动项目(XJNU202212)。

[作者简介] 王一帆(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信方面研究, E-mail: 2257899662@qq.com。

* [通讯作者] 魏同成(1995-), 男, 实验师, 主要从事光通信、通信信号处理等方面研究, E-mail: 1172379233@qq.com。

然可以满足室内视距链路通信,但是其光照强度无法满足整个房间内的照明。对不同调制方式的误码率与信噪比及带宽与通信速率关系进行仿真,仿真结果表明,一是4PPM抗干扰能力强、2PPM及OOK(On-Off Keying, OOK)调制居中、4脉冲幅度调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)方式抗干扰能力最差;二是4PAM带宽利用率最高、OOK居中、4PPM带宽利用率最低。目前FPGA具有设计灵活、兼容性强、运算速度强等优点^[14]。综合考虑下,文章选择EP2C8Q208C8N为核心的数字信号处理器,抗干扰能力强且易实现的2PPM调制方式,接收端采用AD620二级放大电路,搭建了一套室内可见光通信系统。实验结果表明该系统在通信速率为1Mbps、通信距离为3.5m时误码率小于 1×10^{-5} 。该系统发射端硬件电路设计简单,接收端一级放大电路接收灵敏度高、失真小,一级流压放大电路配合二级放大电路抗干扰能力强,进一步提升了可见光通信系统的通信距离。

1 系统模型

图1为室内可见光通信系统的信道模型。首先通信系统将调制光信号 $x(t)$ 通过室内信道传输,然后光信号通过室内信道的衰减和噪声的叠加到达接收端,最后光信号通过接收端光电二极管将光信号转换成光电流信号 $y(t)$ 。室内信道模型表达式如式(1)所示^[15]。其中 γ 为光电探测器响应效率(单位为A/W), $n(t)$ 为高斯白噪声, \otimes 为卷积运算, $x(t)$ 为发射的信号, $y(t)$ 为输出的光电流。

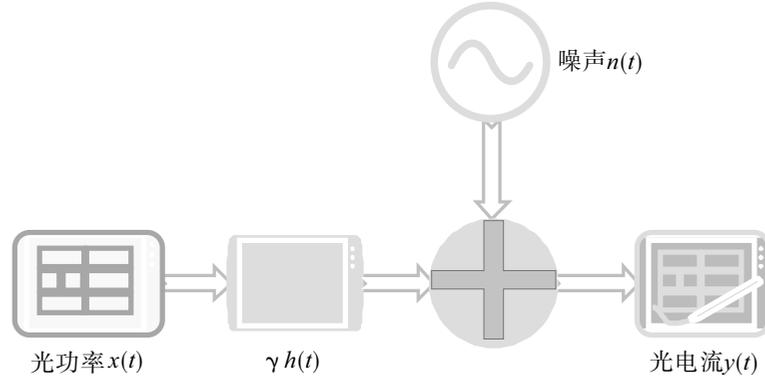


图1 室内可见光通信系统模型

$$y(t) = \gamma x(t) \otimes h(t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \gamma x(\tau) h(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (1)$$

在视距链路中(Line Of Sight, LOS),视距链路信道的增益如式(2)所示。其中, m 为朗伯辐射指数, ϕ 为LED的辐射角, ψ 为光线入射角, D 为LED到接收探测器之间的距离, A 为探测器的面积, $g(\psi)$ 为光电二极管前端的聚光器增益系数, $T(\psi)$ 为光滤波器增益。

$$H_{\text{LOS}}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D^2} \cos^m(\phi) T(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2)$$

LOS链路的接收功率和信道增益关系如式(3)所示。其中, P_{LOS} 为视距链路接收光功率, H_{LOS} 为视距链路信道的直流增益, P_T 为发射信号功率。

$$P_{\text{LOS}} = P_T H_{\text{LOS}} \quad (3)$$

室内可见光通信信噪比关系表达式如式(4)所示。其中, γ 为光电器件的响应度, P_R 为接收信号功率, $\sigma_{\text{thermal}}^2$ 为热噪声功率, σ_{shot}^2 为散粒噪声, $P_{\text{R(ISI)}}^2$ 为码间干扰噪声^[16]。

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{\gamma^2 P_{\text{R(signal)}}^2}{\sigma_{\text{thermal}}^2 + \sigma_{\text{shot}}^2 + \gamma^2 P_{\text{R(ISI)}}^2} \quad (4)$$

基于2PPM调制的室内可见光通信系统的误码率与信噪比的关系如式(5)所示,随着信噪比的增加,误码率降低^[17]。

$$P_{2PPM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR}) \quad (5)$$

本系统在空间大小为5m × 5m × 3m的房间顶部中央架设一台高亮LED进行仿真实验,通信系统仿真实验具体参数设置如表1所示^[18]。

表1 VLC系统仿真参数

名称	取值范围	名称	取值范围
探测器高度	0.85m	每个阵列LED数目	1
墙壁反射率	0.8	每个LED间距	2cm
LED工作电压	2.8V ~ 4.7V	探测器视场角	70°
LED工作电流	100mA ~ 1000mA	探测器接收面积	1cm ²
LED发射功率	5W	聚光器折射率	1.5
LED功率半角	30°	室内反射元大小	0.1m × 0.1m
LED中心光强	500cd	LED色温	5600K
等效噪声带宽(B)	100Mbit/s	背景光电流(I _{bg})	5.1mA
噪声带宽因子(12)	0.562	室内绝对温度	298K
探测器单位面积电容(η)	112pf/cm ²	开环电压增益(G)	10
FET沟道噪声因子(Γ)	1.5	FET跨导(g _m)	30ms
噪声带宽因子(13)	0.087		

结合上述公式及参数对室内可见光通信系统信道建模进行仿真,本仿真没有考虑非视距链路的影响(图2)。图2(a)是单个LED在室内接收平面光照度分布图。由于单个高亮LED的光照强度有限且安装了聚光镜,在5m × 5m × 3m的大房间内大部分空间光照强度几乎为0LUX,同时该系统所使用的LED器件采用聚光透镜以限制其辐射角,使得光线汇聚能力明显增强,进一步提升了视距链路下通信系统的性能。图2(b)及图2(c)是单个LED在室内接收光功率及信噪比分布情况,在LED正下方具有不错的信噪比分布。

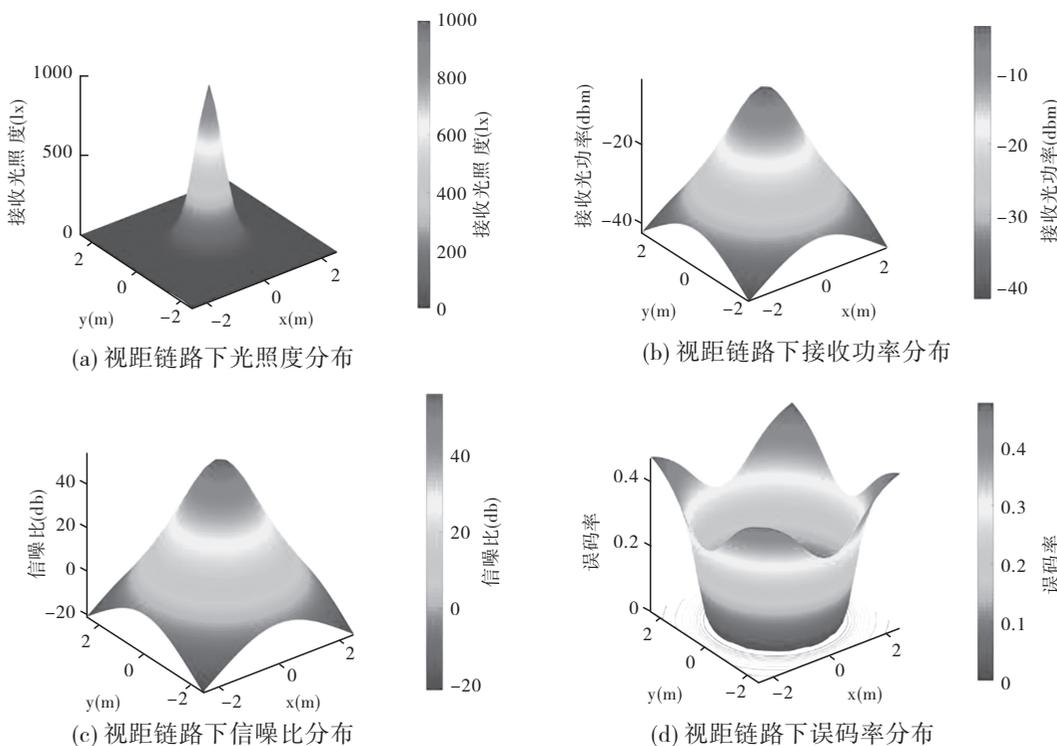


图2 单个LED接收面系统性能仿真图

距离LED越近的地方,光强越强、信噪比越高。图2(d)是通信系统采用2PPM调制时室内误码率分布图可以看出,距离LED光轴较近的地方误码率较小,偏离光轴的大部分区域误码率较高。经验证单个LED光照度及误码率仿真与实测数据基本吻合,也侧面证实了该系统模型的正确性。

文章分别对不同调制方式的抗干扰能力及带宽利用率进行了分析,不同调制方式的性能分析参考文献[19],利用MATLAB进行仿真,结果如图3所示。由图3(a)可知,一是在相同的传输速率下,4PPM系统所需带宽最大、4数字脉冲间隔调制(Digital Pulse Interval Modulation, DPIM)次之、OOK第三、4PAM所需带宽最小;二是随着通信速率的提高,带宽需求也将会进一步增加。由图4(b)可知,一是在同一信噪比下,4PPM调制方式抗干扰能力最好、2PPM和OOK次之、高阶PAM调制方式的抗干扰能力最差;二是随着信噪比的增加,系统的抗干扰能力提高,在信噪比为10dB时,2PPM调制方式的误码率低于 1×10^{-5} 。

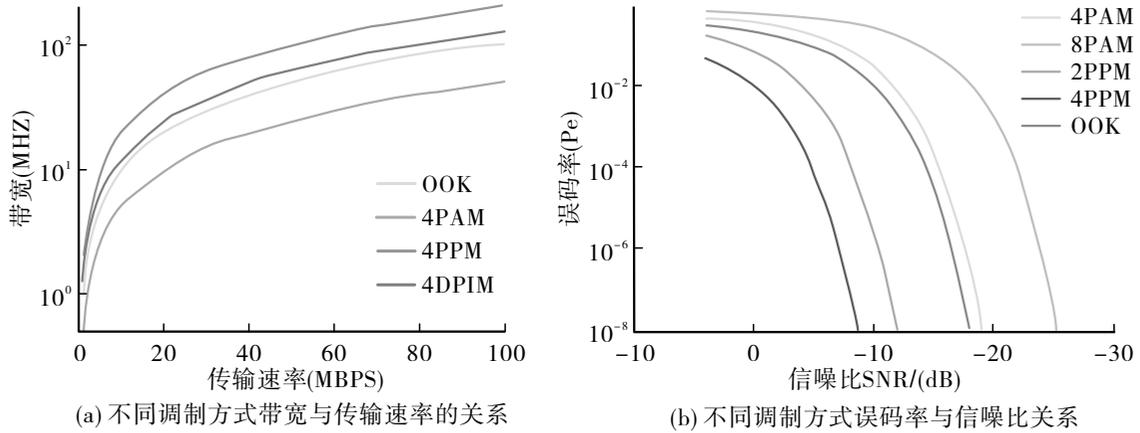


图3 不同调制方式性能仿真图

在室内可见光通信过程中,通信系统由于受到背景光等噪声干扰,致使信噪比较低,综合考虑系统带宽利用率、抗干扰能力及实现的难易程度,本实验选择2PPM作为本系统的调制方式。

2 实验装置

2.1 系统方案

本系统所构建的系统框图如图4所示,基于FPGA的室内可见光通信系统由发射端、室内信道和接收端三部分组成。在发射端,首先PC机将信源文本信息数据经由串口发送到数字信号处理器处理模块;然后数字信号处理器将数据进行2PPM编码,再将编码好的数据加上帧头后封装成帧,接着将调制好的2PPM数据帧通过数字信号处理器端口加载到LED驱动上;最后调制信号通过白光LED将信息加载到光信号中发射出去。

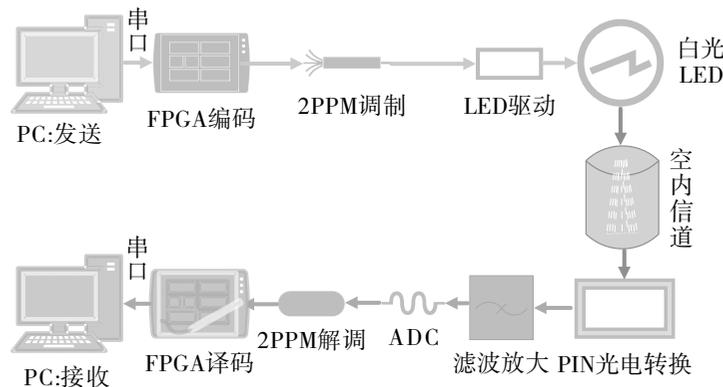


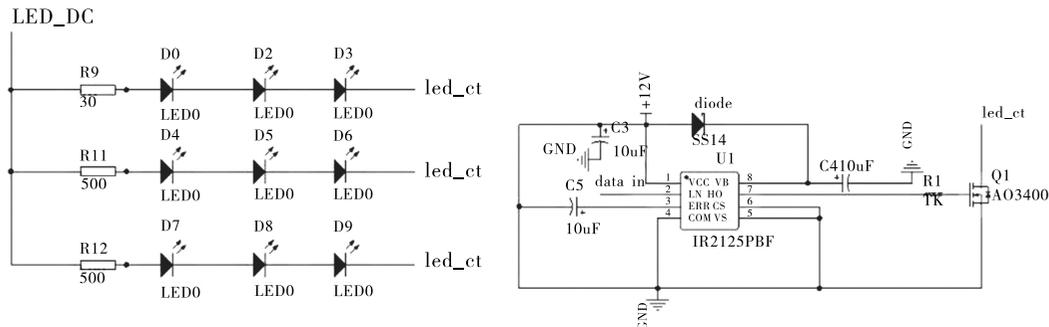
图4 室内可见光通信系统框图

LED发送的调制信号经过室内信道传输到接收端后,首先经过PIN模块将光信号转换成电流信号,电流

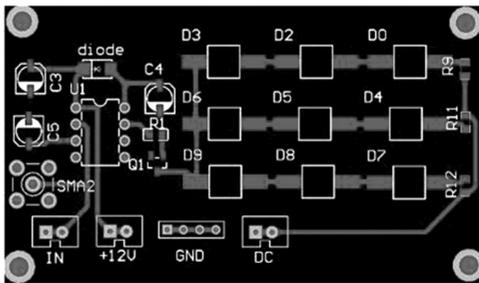
信号经过流压转换模块将电流信号转换成电压信号;然后信号经过滤波放大后经模拟数字转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)模块将电压信号转换为数字信号;其次数字信号处理器进行帧头同步判别,同步完成后将数据传送给数字信号处理器进行解调和译码;最后数字信号处理器将译码后的信息经由串口传送至PC端,并进行实时误码率分析。

2.2 发射和接收端电路

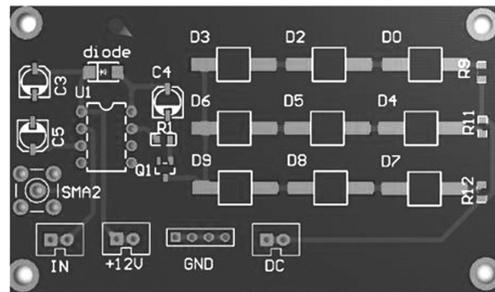
在室内可见光通信系统中,发射端电路如图5所示。发射端主要采用IR2125型栅极驱动芯片,该芯片驱动通道数1个,供电电压为12V直流供电,峰值灌电流为3.3A,峰值拉电流为1.6A,上升及下降时间分别为43ns、26ns,该芯片输入可兼容TTL电平,输出驱动器具有高脉冲电流缓冲级,是一款具有高电压、高速率及大功率的驱动器。同时选用AO3400场效应管作为室内可见光通信系统的通断开关,该场效应管具有输入电阻高(一般几十至几百兆欧)、电流放大倍数大(一般可达几百倍)等优点。



(a) 发射端电路原理图



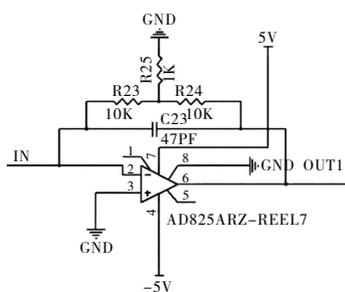
(b) 发射端电路PCB



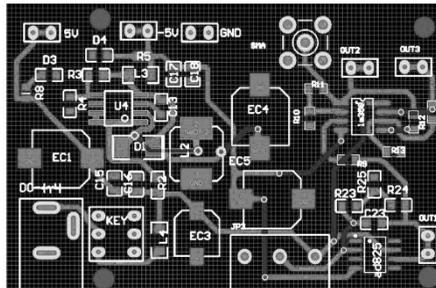
(c) 发射端电路PCB-3D

图5 发射端电路图

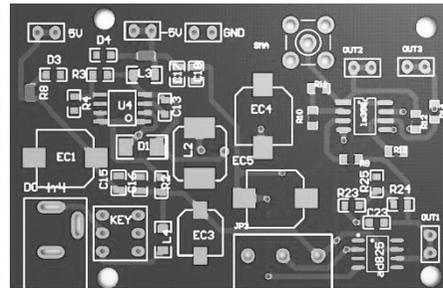
接收端电路如图6所示,流压电路及放大电路采用AD8285芯片,该模块采用正负5V供电,最小电流分辨率率为10nA,AD8285芯片具有放大倍数大、阻抗抗高和偏置电流低等优点,可用于光电检测器、数据采集前端及微弱信号检测等。本系统二级放大采用AD620芯片电路。经实验验证,二级放大电路可以较好地解决一级放大电路随距离变化而信号减弱的问题。



(a) 接收端电路原理图



(b) 接收端电路PCB



(c) 接收端电路PCB-3D

图6 接收端电路图

2.3 数字信号处理器设计

本系统数字信号处理器采用Altera公司Cyclone II系列高性能的FPGA(EP2C8Q208C8N),该芯片共有

208个管脚,其中IO口182个,逻辑单元8256个,乘法器 18×18 个,最高主频为402MHz,开发板利用Altium Designer软件进行2层设计。板上集成了JTAG和AS两种下载接口,方便调试和下载使用,同时板子上带有1个串口、4个LED、1片EPCS4存储器、4个独立按键及高速AD等设备,FPGA实物图及PCB如图7所示。

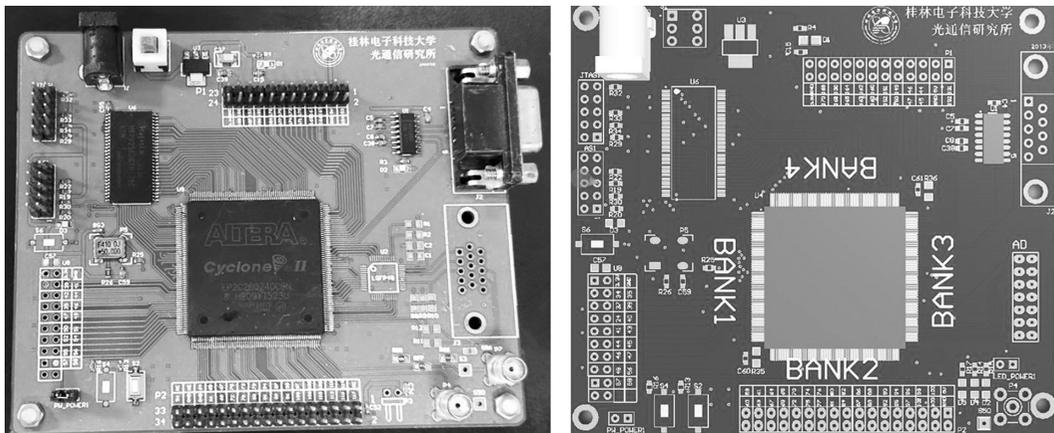
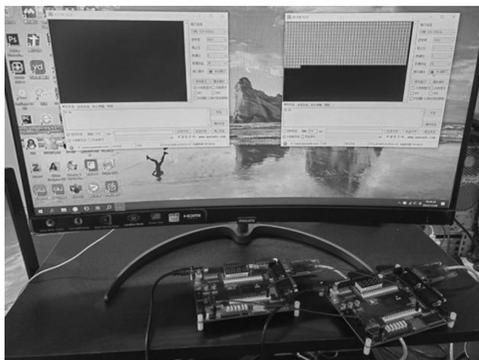


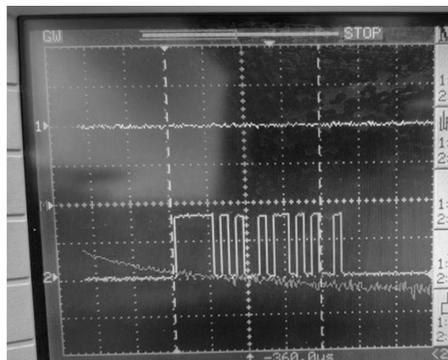
图7 EP2C8Q208C8N实物图及印刷电路板

3 结果与讨论

本系统选择调制方式为2PPM调制,电调系统实物如图8(a)所示。假如PC通过串口发送汉字“魏”,其十六进制编码为CE-BA,二进制编码为1100-1110-1011-1010,具体的调制信号波形如图8(b)所示。图8(c)为室内可见光通信实验图,图8(d)为在通信距离为110cm时一级放大电路输出波形,此时电压峰值为3.7V。



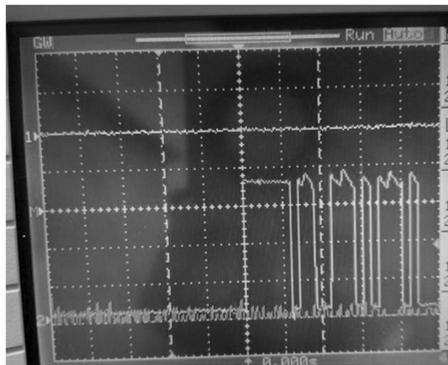
(a) 电调系统实物图



(b) 电调信号



(c) 光调系统实物图



(d) 110cm通信时一级放大电路输出信号

图8 光调和电调实验图

发射端LED采用优质灯芯、自然光线,LED发光功率为5W,聚光杯采用铝合金发光杯,聚光杯直径4.5cm、深2.8cm,相较于没有聚光杯的LED,本系统LED光线无损不漏且射程更远,故信号到达接收端时信

号质量更好,通信距离更远。图9(a)表示LED的光照特性,经测试LED的开启电压为2.2V,随着供电电压的提高LED光照强度也迅速增加,在供电电压达到4.3V时光照强度突破 1×10^4 LUX。

图9(b)测试结果表明光照强度随通信距离的变化,在通信距离为20cm时,加载通信数据时的LED光照强度为2000LUX,不加载数据常亮LED的光照强度为 2×10^4 LUX。通过分析可知,一是当LED加载数据时通信数据中的低电平影响了LED的发光强度。同时,当没有数据传输,LED为低电平时也会影响光照强度。二是有数据传送时LED的光照强度随通信距离的变化较小,而无数据传输时LED的光照强度随通信距离的变化较大,其变化呈指数递减。通过实际测试,此款LED具有亮度高、聚光特性好等特点,该LED可应用于手电照明、家用及可见光通信系统中。

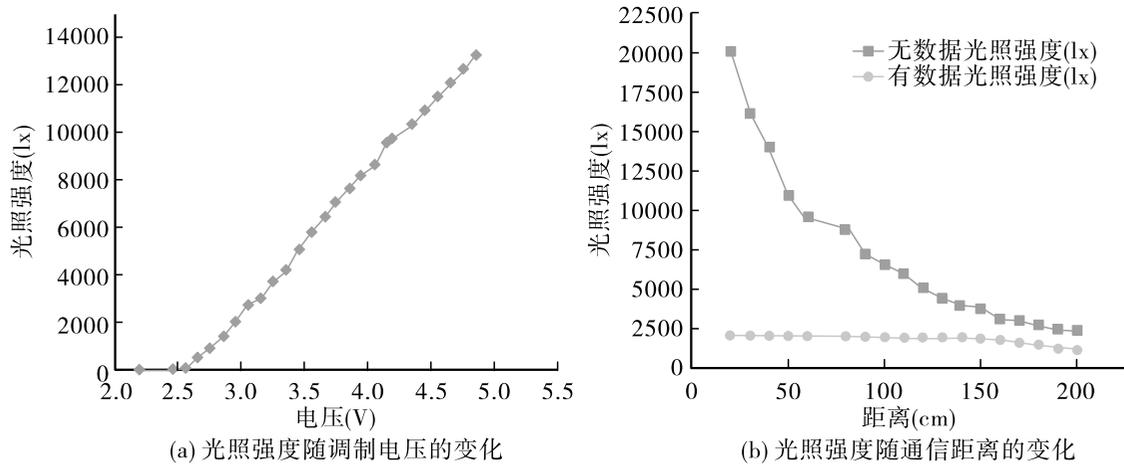


图9 LED特性仿真图

在Modelsim仿真测试中,先将系统时钟(clk)设置为50MHz,将复位rst信号拉低100ns再拉高,串口波特率选择9600bps,一次发送两个字节信息,分两次发送。在发射端,第一个字节为38(0011-1000)、第二个字节为C8(1100-1000)、第三个字节为12(0001-0010)、第四个字节为FC(1111-1100)。首先串口检测是否有PC机发送的数据,一旦检测到低电平则是串口启动开始位,串口接收数据时每次在数据中间的时候进行采样以减少误差,每次接收两个字节数据进行数据合并,将其拼接为一个字,即两个字节16位数据。当16位数据完成后将调制标志位拉高。然后进行2PPM调制,调制算法分别将0调制为01、将1调制为10,调制完成后加上帧头1111110,合并为一帧38位数据。最后通过FPGA时序设置好通信速率,按照设置的每位时隙分别将38位数据通过FPGA的IO端口发射出去,具体发射端仿真时序如图10所示。

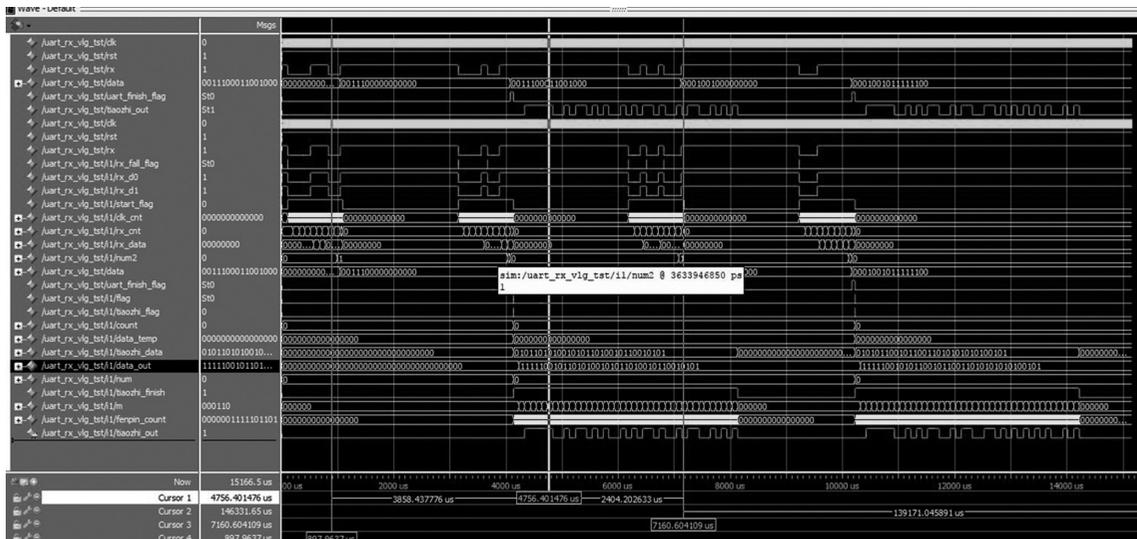


图10 FPGA发射端Modelsim仿真数据

在接收端 Modelsim 仿真测试中,首先将系统时钟(clk)设置为 50MHz,将复位 rst 信号拉低 100ns 再拉高,延时 2ms 时间,串口波特率选择 9600bps,一次模拟接收两个字节信息,分两次发送。首先通过 simulation.vt 文件在相同通信速率下模拟出发射端的帧头和数据,接收端模拟的四个字节信息分别为 38(0011-1000)、18(0001-1000)、C8(1100-1000)、F8(1111-1000),然后接收端进行帧头判别并将数据接收存入数组中,当数据帧头同步完成后进行 2PPM 数据解调。最后,当解调完成后给一个串口启动标志位,串口在 9600bps 时进行数据传输,通过串口将数据发送到 PC 进行误码率判别。接收端仿真时序如图 11 所示。

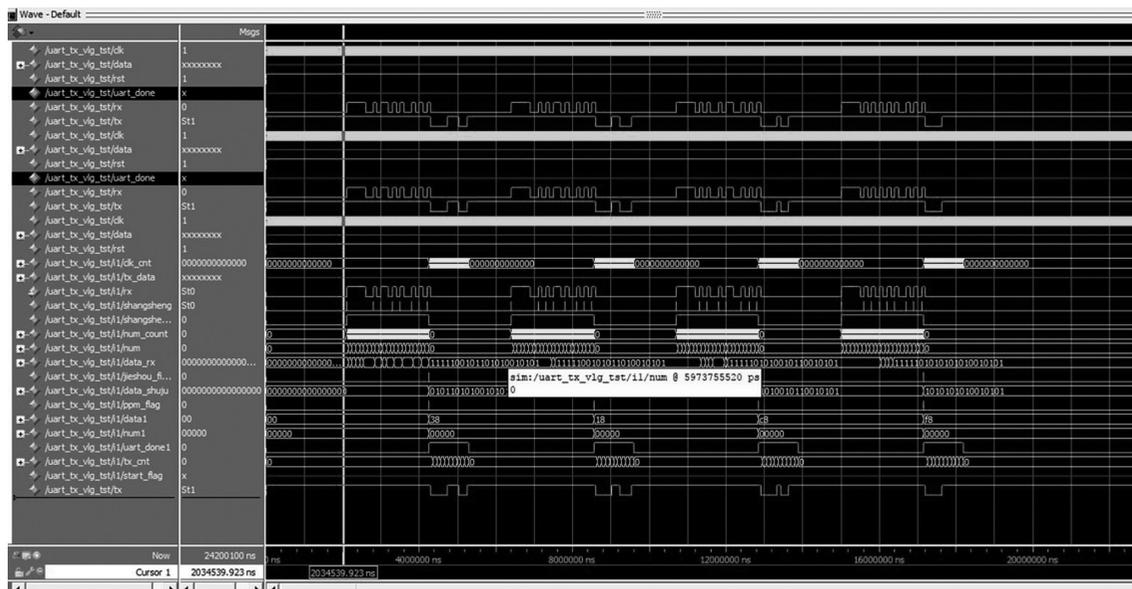


图 11 FPGA 接收端 Modelsim 仿真数据

误码率是体现在规定时间内传输数据准确性的重要性能指标。为了验证系统硬件平台的稳定性以及算法优化后方案的可行性,在通信速率为 1Mb、通信距离为 3.5m 时,对设计的基于 2PPM 调制的室内可见光通信系统进行误码率分析,其误码率如图 12 所示。该系统误码率低于 1×10^{-5} ,加入二级放大电路后,室内可见光通信系统的通信距离及抗干扰能力进一步提高,测试达到了预期效果。



图 12 实时误码率分析

4 结论

文章设计并实现了基于2PPM调制的室内可见光通信系统,实验设定其通信距离为3.5m,实验的最大数据速率为1Mbps。本实验硬件部分选择了EP2C8Q208C8N数字信号处理器作为核心处理芯片,利用LED驱动、ADC及光电探测器实现了室内可见光的可靠通信。针对单个高亮LED,本实验对室内可见光通信系统信道的光照强度、接收光功率、信噪比及误码率进行了仿真分析,仿真结果表明单个高亮LED可以实现可靠的通信,但是其无法满足整个房间的照明。经多次实际测试,加入的二级放大电路可以提高系统的可靠性,降低系统误码率。本系统具有结构简单、稳定可靠、误码率低等优点,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] XING F, HE S, LEUNG V C M, et al. Energy Efficiency Optimization for Rate-splitting Multiple Access-based Indoor Visible Light Communication Networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(05): 1706–1720.
- [2] 杨彦兵,胡超,鲁邦彦,等.基于可见光和射频融合的通信定位一体化系统[J].*通信学报*, 2023, 44(12): 146–157.
- [3] 肖华,王艳菊,王湛朗,等.可见光通信中无人机搜寻通信光源的优化方法[J].*发光学报*, 2023, 44(12): 2277–2286.
- [4] SINGH A, SRIVASTAVA A, BOHARA V A, et al. Optimal LED Power Allocation Framework for A Location-assisted Indoor Visible Light Communication System[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(03): 1–14.
- [5] WU Q, ZHANG J, GUO J N. Position Design for Reconfigurable Intelligent-surface-aided Indoor Visible Light Communication Systems[J]. *Electronics*, 2022, 11(19): 3076–3090.
- [6] HUSSAIN B, WANG Y, CHEN R, et al. Lidr: Visible-light-communication-assisted Dead Reckoning for Accurate Indoor Localization[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(17): 15742–15755.
- [7] TRAN H Q, HA C. Machine Learning in Indoor Visible Light Positioning Systems: A Review[J]. *Neurocomputing*, 2022, 491: 117–131.
- [8] ÇELİK Y. Indoor Visible Light Communication and Positioning with Pantilt Receiver[C]//2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). IEEE, 2022, 8(13): 1–5.
- [9] GUANGYUN L I, SENZHEN S U N, LI W, et al. Research and Application of Indoor Visible Light Communication Positioning Technology[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(06): 909–924.
- [10] ZHANG Y, CAI O, YANG Y. Shadow Effect of Human Obstacles on Indoor Visible Light Communication System with Multiple Light Sources[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(11): 6356–6366.
- [11] HUANG X X, WANG Z, SHI J, et al. 1.6 Gbit/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.
- [12] ABOAGYE S, NGATCHED T M N, DOBRE O A, et al. Intelligent Reflecting Surface-aided Indoor Visible Light Communication Systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(12): 3913–3917.
- [13] KHALIFEH A, ALAKAPPAN K, SATHISH KUMAR B K, et al. A Simulation Analysis of LEDs' Spatial Distribution for Indoor Visible Light Communication[J]. *Wireless Personal Communications*, 2022, 122(02): 1867–1890.
- [14] 魏同成,杜勇,左杨.DSP+FPGA的EMIF通信系统设计与实现[J].*新疆师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(01): 14–24.
- [15] MIRAMIRKHANI F, UYSAL M. Channel Modelling for Indoor Visible Light Communications[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2020, 378(2169): 2019–2027.
- [16] QIU Y, CHEN H H, Meng W X. Channel Modeling for Visible Light Communications—A survey[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2016, 16(14): 2016–2034.
- [17] ZHU X, WANG C X, HUANG J, et al. A Novel 3D Non-stationary Channel Model for 6G Indoor Visible Light Communication Systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(10): 8292–8307.
- [18] 杜勇,魏同成,王静,等.室内可见光通信信道建模的研究[J].*新疆师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(04): 9–17.
- [19] 柯熙政,梁静远,许东升,等.无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展[J].*光电工程*, 2022, 49(03): 3–21.

Design and Implementation of FPGA-based Indoor Visible Light Communication System

WANG Yi-fan, WEI Tong-cheng*, ZHANG Bo-zhen, ZHANG Ying-xiang, DU Yong

(Xinjiang Key Laboratory for Luminescence Minerals and Optical Functional Materials, School of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang, 830054, China)

Abstract: Visible Light Communication (VLC) has the advantages of high communication rate, green environmental protection, high security, no need for spectrum licensing, etc, and has become a hot spot of research. In view of the complexity of the visible light communication system design and the problem of short communication distance, this paper adds a secondary amplifier circuit at the receiving end to further improve the anti-interference ability of the system, and at the same time, it also researches the channel model of the indoor visible light communication system and combines with the bright light-emitting diode to carry out the simulation and analysis of the light intensity, the received power, the signal-to-noise ratio and the bit error rate in the indoor space, and analyses the noise-resistant performance and the bandwidth utilization rate of the different modulation modes. Field Programmable Gate Array (FPGA) is used as the control chip of the optical communication system, the indoor visible light communication system based on 2PPM (Pulse-Phase Modulation, PPM) is designed. Communication performance of the system under the scheme is verified by building an experimental platform, Bit Error Ratio less than 1×10^{-5} at a communication distance of 3.5m, and the experimental results show that the communication system has the advantages of low Bit Error Ratio and simple structure, which meets the requirements of high-performance indoor visible light communication system.

Keywords: Field-Programmable Gate Array (FPGA); Pulse position modulation; Indoor visible light communication; Secondary Amplifier Circuit