

基于单光源的全双工可见光通信系统设计

杨玉峰, 蒋明争*, 张颖, 张欢

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 设计了基于单光源的全双工可见光通信系统, 实现了可见光兼具照明和通信的功能。利用“猫眼”逆向调制器对下行光信号进行两次调制, 将上行信息调制到下行光信号上并反射回主动端。实验表明, 单光源可以实现全双工可见光通信链路, 并且使上下行链路的通信互不干扰, 通信效果良好。

关键词 光通信; 逆向调制; 上行链路; 下行链路; 全双工通信

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.010603

Design of Full Duplex Visible Light Communication System Based on Single Light Source

Yang Yufeng, Jiang Mingzheng*, Zhang Ying, Zhang Huan

*School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract A full duplex visible light communication system based on single light source is designed, which realizes the functions of both visible light illumination and communication. The cat eye reverse modulator is used to perform remodulation on the downlink optical signal, and the uplink information is modulated onto the downlink optical signal and reflected back. The experimental result shows that the system with single light source can realize full duplex visible light communication and make the communications between the uplink and the downlink independent, and the communication effect is good.

Key words optical communication; reverse modulation; uplink; downlink; full duplex communication

OCIS codes 060.4510; 060.5060; 060.2605; 060.2630

1 引言

随着科学技术的发展和人类生活质量的提高, 人们对通信信息的需求也在不断扩大。目前, 绝大多数的无线通信系统仍然是射频无线电通信系统。随着无线电频谱资源的日趋紧张, 无需频谱资源许可的无线光通信技术备受人们的青睐。

可见光通信(VLC)是无线光通信的一种, 利用白光 LED 的照明快速开关特性, 将基带信号调制到白光 LED 发出的光波上, 使白光 LED 在照明的同时能够进行数据传输^[1]。Rahaim 等^[2]提出了将 Wi-Fi 与可见光通信系统相结合的方案, 使用其作为可见光通信系统中的上行链路, 从而使下行

可见光链路的通信速率达到 10 Mbit/s, 而上行射频的通信速率达到 30 Mbit/s。张浩等^[3]分析了室内可见光通信中信道的障碍成因, 将可见光信道障碍分成大气障碍、非完全障碍、完全障碍三大类, 并提供了每一类信道障碍的解决方案, 所得结论为提高室内可见光通信系统的可靠性提供了参考。Tsonev 等^[4]使用调制带宽为 60 MHz 的砷化镓发光二极管, 采用正交频分复用(OFDM)的调制方式, 结合预均衡技术和自适应数据加载技术, 首次在单个 LED 发光二极管上实现了通信速率为 3 Gbit/s 的可见光通信系统。Cossu 等^[5]展示了可见光与红外波段组成的混合通信方案, 该方案以可见光作为下行链路, 以红外光作为上行链路的波

收稿日期: 2018-07-23; 修回日期: 2018-09-04; 录用日期: 2018-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(61405157, 61377080)、陕西省自然科学基金(2016JM1018)

* E-mail: 2918902691@qq.com

分双工通信系统,上下行链路均采用离散多音频调制(DMT)技术,在通信距离为 2 m 的条件下实现了 400 Mbit/s 的双工通信。Mossaad 等^[6]针对可见光通信中 OFDM 调制技术的高峰均比(PAPR)的问题进行研究,提出在发射端将高 PAPR 的 OFDM 信号分割为多个低 PAPR 信号并分别通过多个 LED 进行传输,减少了 LED 光源的非线性对 PAPR 过大信号的影响。关伟鹏等^[7]设计了一种采用双重调制技术的可见光通信系统,该系统中 LED 发射端对信号进行了脉冲振幅调制和脉冲宽度调制,在提高通信速率的同时保持了光照强度的恒定,并且该调制技术可以按照室内照明的需要控制光通量以适应不同的应用场合。樊养余等^[8]结合离散正弦变换和离散余弦变换技术提出了一种新型的 DST/DCT 直流偏置—离散多音频调制方案,并分析该方案不同调制阶数以及峰均功率比和限幅噪声等对误码率的影响,通过仿真证明该方案能够有效地拓展离散多音频调制方式中独立子载波的个数,提高了可见光通信系统中的数据传输速率。Basnayaka 等^[9]设计了一种结合射频与可见光通信技术的室内可见光通信系统,用以解决室内可见光通信系统中,光照度不均衡所引起的室内可见光通信信号覆盖不均匀的问题。通过仿真验证,可以有效地减少室内可见光通信系统的覆盖盲区。武梦龙等^[10]通过时分复用方式,并以 LED 作为接收端和发送端设计了可以在不同收发仰角下实时双向可见光通信系统,可以实现 2 m 以上的 8 Mbit/s 速率的可见光通信。

随着新型材料的出现与光电子技术的发展,逆向调制技术也备受关注。Jenkins 等^[11]基于微机电系统(MEMS)研制了一种光学相位调制器,该调制器由一个球型透镜和 MEMS 阵列调制发射结构组成,调制速率达到了 400 bit/s。Ziph-Schatzberg 等^[12]利用 MEMS 变形镜设计了一种光学逆向语音通信系统。在角反射器的一个反射平面上设置了电驱动的 MEMS 变形镜,通过调制信号控制变形镜的反射率从而实现对激光信号的逆向调制,在 200 m 的通信距离上实现了 1 kbit/s 的保密语音信号传输。张来线等^[13]详细介绍了逆向调制自由空间激光通信技术的原理以及“猫眼”逆向调制终端的结构,在国内外猫眼逆向调制自由空间激光通信技术在调制器特性、“猫眼”光学系统和技术应用等方面的研究现状。Geng 等^[14]提出了一种对单向光源两次调制的方案,使用逆向调制器实现全双工的激光

无线通信系统。该系统中正向链路使用脉冲位置调制(PPM)方式,逆向链路使用通断键控(OOK)调制方式,主动端的激光束的调制频率为 20 Hz,逆向 OOK 调制信号调制到下行 PPM 信号上并反射回询问端,实现单光源的双工通信链路。徐山河等^[15]利用声光调制器和光学元件搭建了逆向通信系统,通过对同一光束采用内调制和外调制实现了单向光源全双工通信,其中下行通信速率为 30 kbit/s,上行通信速率 3 Mbit/s。邱灏等^[16]提出一种采用单光源的全双工逆向调制系统,将逆向传输信号加载到下行光信号的包络上,利用包络检波技术从返回信号的幅度中检测出上行链路信号,该系统的询问端调制速率为 2.048 Mbit/s,逆向端的调制速率为 2.0 kbit/s。张鹏等^[17]提出一种使用双波长发射方式的全双工通信系统,使用两种不同波段的激光分别作为正向链路和逆向链路的通信光源,其光信号间互不干扰,提高了逆向链路的通信速率。任建迎等^[18]对“猫眼”光学系统的优化方法、多量子阱电吸收型调制器以及 MEMS 型调制器的特点进行了介绍,重点对 MEMS 型调制器进行了分析和测试。

本文采用可见光通信技术和逆调制技术,分别构建了室内 VLC 中的下行和上行通信链路,实现了单光源的全双工通信系统。

2 系统设计原理

LED 可见光通信系统通常由上下两条通信链路构成,其中由主动端到逆向端的通信链路为下行通信链路,信号加载到 LED 的驱动电路上直接对 LED 发出的光强进行调制;而由逆向端到主动端的通信链路为上行链路,其中下行链路采用四进制差分相移键控(DQPSK)调制,上行链路采用频移键控(FSK)调制。

系统利用“猫眼”逆向调制器对下行光信号进行两次调制,将上行信息调制到下行光信号上并反射回主动端,再由主动端进行接收,是以下行光信号作为载波的逆向通信链路,其原理如图 1 所示。

3 下行链路设计

输入的电压信号通过 LED 驱动电路转换成电流信号用以控制 LED 发光,最终生成调制的光波信号。LED 驱动电路由直流偏置电路、预均衡电路^[19]、放大电路和 Bias-T 电路 4 部分组成。LED 驱动电路的整体结构如图 2 所示。

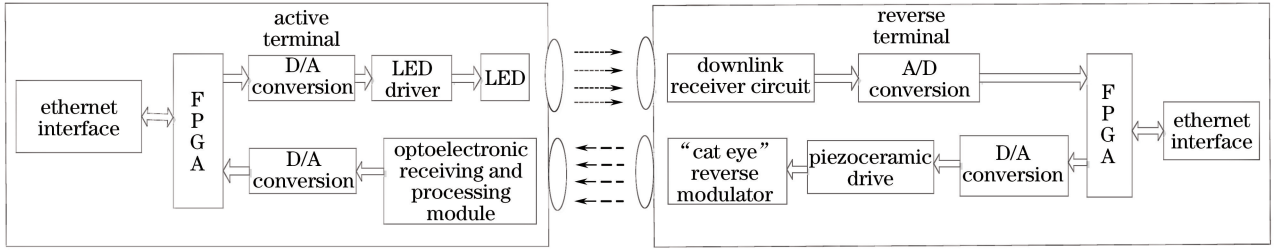


图 1 可见光全双工通信系统框图

Fig. 1 Visible light full duplex communication system block diagram

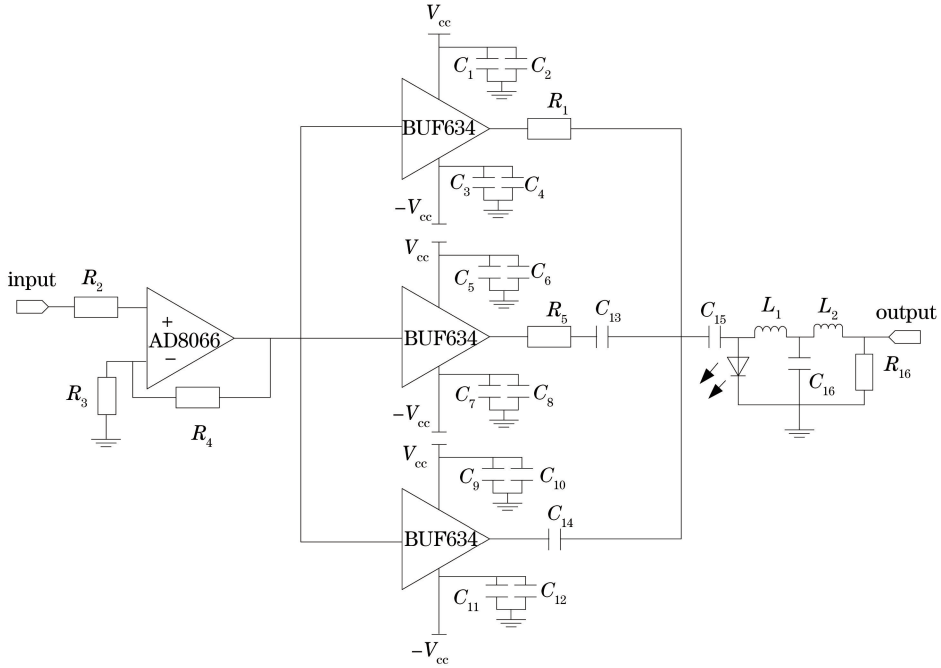


图 2 LED 驱动电路原理图

Fig. 2 Schematic of LED drive circuit

在上述电路中,直流偏置电路的目的是点亮 LED 并在线性区域工作。预均衡电路的作用是通过在信号中衰落的分量进行补偿,减少 LED 在高频段响应强度不足而导致的信号失真问题,以提高 LED 的调制带宽,在设计中选取了 BUF634T 缓冲芯片作为核心芯片。图 2 中,第一路驱动模块为低频段输出,电阻 R_1 的作用是限制低频段电流,从而减少 LED 的低频段响应;第二路为中频段加重,电阻 R_5 的作用是降低中频段电流,同时与电容 C_{13} 协作,平坦 LED 的中频段响应;第三路针对高频段进行加重。整个预均衡电路的响应带宽由 C_{14} 决定,电路的谐振频率^[20]为 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC_{14}})$,式中 L 为 LED 在高频工作状态时引入的等效电感。通过设置合理的电路参数,使 3 支路的频率特性互相补偿,从而提高 LED 的等效带宽。放大电路的设计选取了 AD8066 芯片作为核心放大器,具有很强的带

负载能力,非常地适合系统中 3 路缓冲电路的前端输入。其作用是对输入的交流信号的幅度进行放大,其整体放大倍数为 $\beta = 1 + R_4/R_3$ 。Bias-T 电路的主要功能是将交流调制分量加载到偏置直流上。利用 Bias-T 电路将调制电流和偏置电流相叠加后,通过输出端输出,在调制电流和偏置电流的共同作用下,LED 输出的光信号既达到了照明的效果,也包含了调制信息。

4 上行链路设计

4.1 “猫眼”逆向调制器原理

采用了具有视场角大、结构简单的离焦型“猫眼”逆向调制器作为系统的逆向调制器^[13]。离焦型“猫眼”逆向调制器在“猫眼”光学系统的焦平面处放置反射镜,当该平面镜的位置在轴向改变时,则反射回的光波强度也将发生变化。结合信号处理电路,

并利用下行光信号的逆向通信链路,实现了上、下行通信链路间无干扰,保证了单光源全双工通信的效果。离焦型“猫眼”逆向调制器模型如图3所示。

根据焦平面处反射镜的移动方向不同,“猫眼”逆向调制器具有前向离焦和后向离焦两种状态,前向离焦是反射镜往靠近透镜的方向振动,后向离焦的振动方向则与之相反。前向和后向离焦的原理如图4所示。

在采用LED作为光源的逆向调制系统中,设主动端LED的发射功率为 P ,其环氧树脂封装的透光率为 τ_{tra} ,光束发散角为 θ ;接收器的聚焦透镜口径为 D_{rec} ,透光率为 τ_{rec} ;“猫眼”结构的聚焦透镜口径为 D_{mr} ,透光率为 τ_{mr} ,焦距为 f ;逆向调制器中反射面的反射率为 ρ_{mod} ,其离焦量为 d ,逆向通信链路的

通信距离为 r 。前向离焦时,“猫眼”结构的反射光斑半径为^[21]

$$R_q = \left| \frac{D_{mr}}{2} - \frac{D_{mr}dr}{f(f+2d)} \right| \quad (1)$$

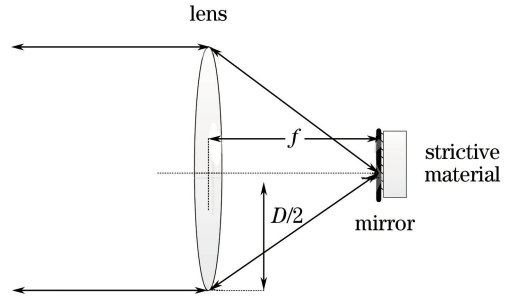


图3 离焦型逆向调制器模型

Fig. 3 Defocused model reverse modulator

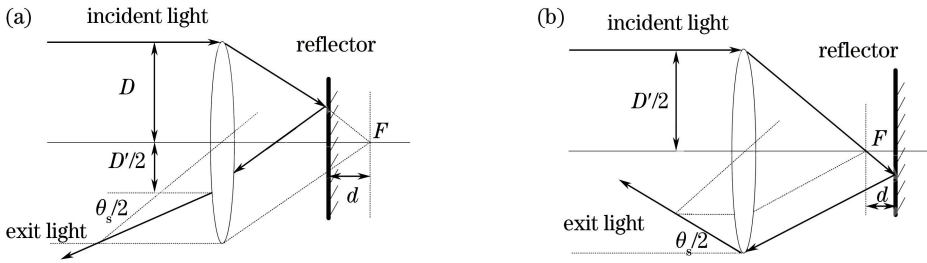


图4 “猫眼”逆向调制器原理图。(a)非离焦型;(b)离焦型

Fig. 4 Cat eye reverse modulator principle diagram. (a) Non-focal type model reverse modulator; (b) defocused model reverse modulator

后向离焦时,“猫眼”结构的反射光斑半径可表示为^[21]

$$R_b = \frac{D_{mr}}{2} - \frac{(f-r)D_{mr}d}{f^2} \quad (2)$$

4.2 逆向调制器驱动电路设计

由于数模转化(DAC)产生的调制信号不足以驱动压电陶瓷片,因此还需要将信号的幅度进行放大。如图5所示,驱动电路选用OPA4228作为压电陶瓷片的驱动芯片,其特点是噪声低、驱动能力高和带宽大等。

OPA4228作为同相输入负反馈电路,可以通过改变 R_2 和 R_3 的大小调节放大倍数,其放大倍数 β 为

$$\beta = 1 + R_2/R_3 \quad (3)$$

4.3 接收电路设计

接收端电路主要作用是从光电探测器输出的信

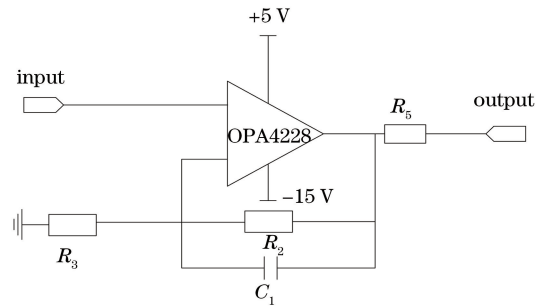


图5 驱动放大电路模块图

Fig. 5 Driving amplifier circuit module

号中分出逆向端调制的上行链路信号,进行放大然后再对其解调。图6为采用AD8066放大芯片以及外围电阻电容(RC)元件构成了带通滤波器的原理图。

令 $S = j\omega$,则一级低通滤波器的传输函数可表示为

$$H(S) = \frac{A_{LPF}/(R_5 R_6 C_1 C_2)}{S^2 + (1/R_5 C_2 + 1/R_6 C_1 + (1 - A_{LPF}) \times R_6/C_1) \times S + 1/R_5 C_2 R_6 C_1} \quad (4)$$

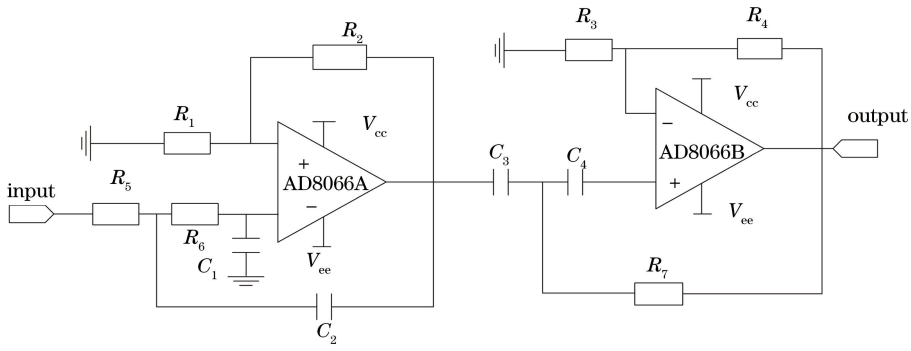


图 6 有源带通滤波器的原理图

Fig. 6 Active bandpass filter principle diagram

式中 A_{LPF} 为低通滤波器的通带增益, $A_{LPF} = 1 + R_8/R_7$ 。由(1)式推导出归一化传输函数为

$$H(S_i) = \frac{A_{LPF}}{S_i^2 + S_i/Q + 1}, \quad (5)$$

式中 Q 为电路品质因数。低通滤波器的截止频率为 $f_c = 1/(2\pi\sqrt{R_5R_6C_5C_6})$ 。

由 AD8066B 及外围 R_3, R_4, R_7, C_3 和 C_4 共同组成二阶高通滤波电路, 令 $S = j\omega$, 则传输函数 $H(S)$ 为

$$H(S) = \frac{A_{LPF}/(R_3R_7C_3C_4)}{S^2 + [1/R_3C_3 + 1/R_3C_4 + (1 - A_{LPF}) \times R_7/C_3] \times S + 1/R_3C_4R_7C_3}, \quad (6)$$

式中 A_{HPF} 为高通滤波器的通带增益, $A_{HPF} = 1 + R_4/R_3$ 。由公式推导出归一化传输函数 $H(S_i)$ 为

$$H(S_i) = \frac{A_{HPF}}{S_i^2 + S_i/Q + 1}. \quad (7)$$

5 硬件性能测试

5.1 实验平台组成

在完成系统各个子系统设计后搭建实验平台。实验中所需要的设备包括: LED 驱动电路板、光电接收板、现场可编程门阵列(FPGA)主控核心板、逆向调制器驱动电路、信号处理电路、光学透镜、示波器、摄像头以及计算机等。测试软件平台 VLC 视

频播放器和 Wireshark 网络分析软件等。实验平台由主动端和逆向端组成。主动端包括摄像头、视频编码器、FPGA 主控核心板、LED 驱动电路和信号处理电路。逆向端由逆向调制器、FPGA 核心板、光电接收板以及计算机等组成。表 1 和 2 分别为系统的主动端和逆向端的实验参数, 图 7 和 8 分别为系统的主动端和逆向端实物图。

5.2 下行链路电路测试

完成硬件电路的设计后, 绘制电路印制电路板(PCB)板并打样焊接, 制作 LED 驱动电路模块。图 9 为 LED 驱动电路模块。

表 1 主动端参数

Table 1 Active terminal parameters

LED model	Beam divergence angle / (°)	Photo-detector	Detector response wavelength / nm	Detector noise equivalent power / (W·Hz ^{-1/2})	Bias current / mA	Modulation current / mA	Lens focal length / mm	Lens diameter / mm
CREEX lamp-Q5	15-35	S5971	320-1000	7.4 × 10 ⁻⁷	500	100	30	25

表 2 逆向端参数

Table 2 Reverse terminal parameters

Piezoelectric ceramics slice / mm	Piezoceramic response frequency / kHz	Piezoelectric ceramic chip driving voltage / V	Inverse modulator lens focal length / mm	Reverse modulator lens diameter / mm	Focusing lens diameter / mm	Focusing lens focal length / mm	Photodetector
27	0-20	±15	90	70	50	70	S5971

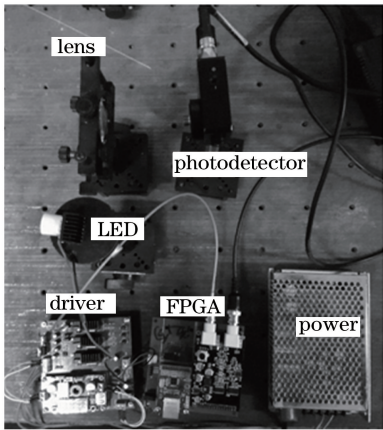


图 7 系统主动端实物图

Fig. 7 Diagram of active terminal

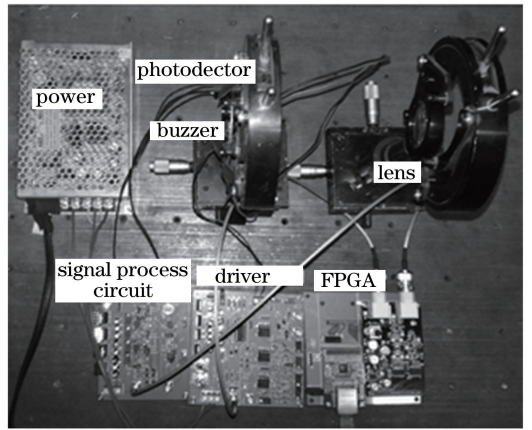


图 8 系统逆向端实物图

Fig. 8 Diagram of reverse terminal

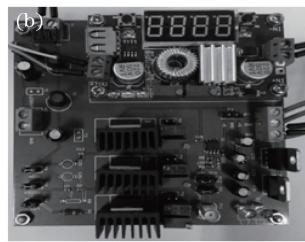
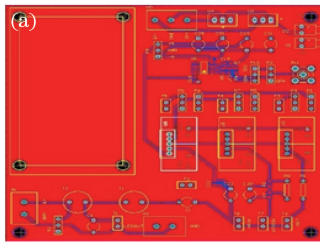


图 9 LED 驱动电路图。(a) PCB 图; (b) 模块

Fig. 9 LED driver circuit diagram. (a) PCB diagram; (b) module

光电接收电路的 PCB 设计如图 10(a)所示,焊接元件后的光电接收模块实物如图 10(b)所示。

图 11 为对硬件电路进行测试的效果图。其中,图 11(a)为对 LED 驱动电路进行测试的效果图。由信号发生器产生正弦载波信号并发送给 LED 驱动电路,在接收端通过光电探测器接收 LED 发出的

光强信号。可以看出,LED 的驱动电路信号在 5 MHz 的频率范围内都能获得良好的调制效应,验证了均衡电路的性能。图 11(b)为光电接收电路在 LED 驱动电路发出 5 MHz 正弦波信号时输出的波形。可以看出,在 5 MHz 的正弦波的速率下,光电接收电路输出的信号完好,没有产生畸变,说明该光

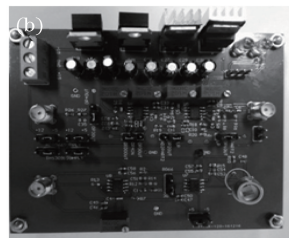
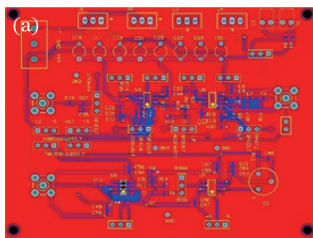


图 10 光电接收电路图。(a) PCB 图; (b) 模块

Fig. 10 Photoelectric receiving circuit diagram. (a) PCB diagram; (b) module

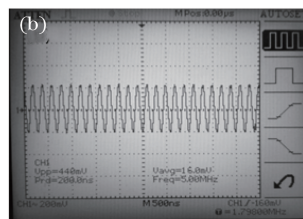
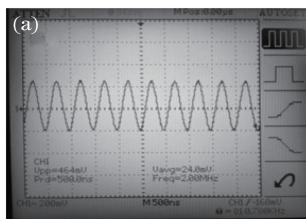


图 11 硬件电路测试图。(a) LED 驱动电路; (b) 光电接收电路

Fig. 11 Hardware circuit test diagram. (a) LED drive circuit; (b) photoelectric receiving circuit

电接收电路完全能满足使用要求。

5.3 上行链路硬件测试

完成硬件驱动和接收电路设计后,将硬件电路的 PCB 进行打样并焊接,如图 12 所示。

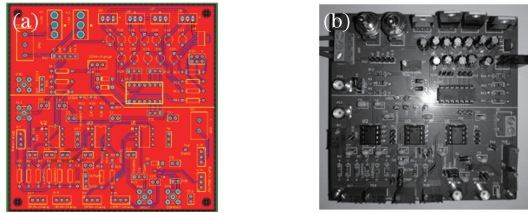


图 12 逆向调制器驱动电路图。(a) PCB 图;(b)逆向驱动电路图

Fig. 12 Reverse modulator drive circuit diagram. (a) PCB diagram; (b) reverse drive circuit diagram

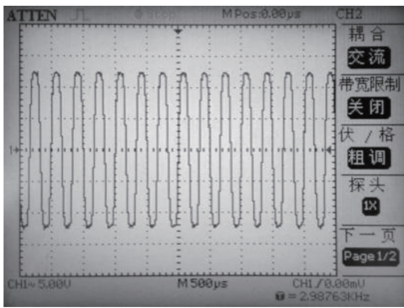


图 13 压电陶瓷驱动电路测试

Fig. 13 Piezoelectric ceramic driver circuit test diagram

5.4 误码率分析

对系统进行了 0.5~4.0 m 的通信测试,测试时间分别选择了下午和晚上,系统实现了下行 5.0 Mbit/s 的通信,上行 2.0 kbit/s 通信。共测试 105 个码元,将接收到的数据与发送数据对比求得误码率(BER),如图 14 所示。

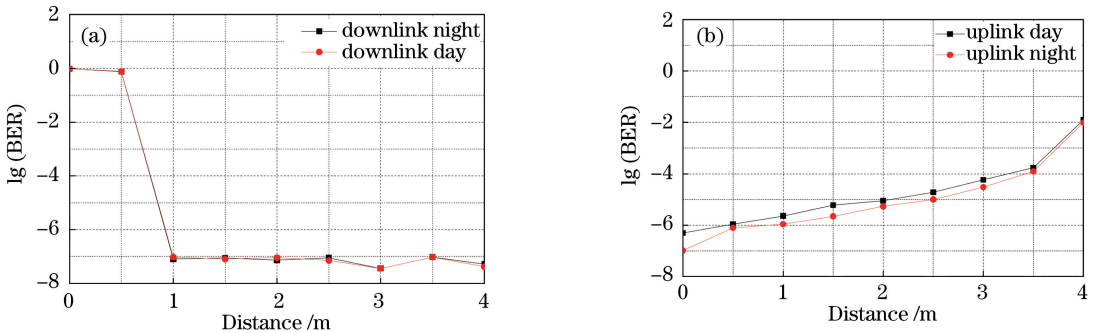


图 14 系统误码率测试。(a)下行链路;(b)上行链路

Fig. 14 System error rate test. (a) Downlink; (b) uplink

6 结 论

通过构建了单向光源条件下的全双工通信信道模型,开发了采用逆向通信链路作为室内可见光通信上行链路的单向光源全双工通信系统,为解决室

图 13 是对设计好的压电陶瓷片驱动电路进行测试的效果图,对其输入 3 kHz,幅度为 5 V 的正弦波信号。可以看到,调制电路输出的信号幅度为 15 V,该信号已经满足压电陶瓷片驱动需要。

由图 14(a)可知,由于白天和夜晚的背景光不同,所以室内的背景光噪声强度也不同,但在 1.0~4.0 m 的通信距离内,下行链路的误码率基本不受背景光强度影响。这是因为电路中设置了相应的处理模块,有效地抑制了背景光的干扰,证明了本系统逆向端的光电接收电路性能较好,达到了设计要求。下行链路的通信误码率 $<7.4 \times 10^{-7}$ 。

而图 14(b)中,在上行链路的测试时,上行通信链路白天和晚上误码率出现了不一致的情况,其中白天的误码率较高。这是因为上行链路的光信号非常微弱,需要在主动端的接收机中设置较高的灵敏度,放大了室内背景光噪声的影响,导致接收机输出信号的信噪比下降。随着通信距离的增加,上行链路误码率也急剧上升。从实验结果来看,在 3.0 m 的距离内,上行链路误码率 $<4.2 \times 10^{-4}$,基本满足了通信需求。

内可见光通信的上行链路提供了新的思路。结合单光源全双工的背景要求,设计了室内全双工可见光通信系统。应用硬件预均衡技术设计了大功率白光 LED 驱动电路以及光电接收电路。实验结果表明,驱动和接收电路性能良好,能够满足通信需要,可以

实现在 3.0 m 的通信距离内主动端到逆向端 5.0 Mbit/s 的传输速率, 逆向端到主动端 2.0 kbit/s 传输速率的稳定全双工通信。

参 考 文 献

- [1] Zhang X F, Wang M, Wang J. Research status and development of indoor positioning based on visible light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100001.
张晓锋, 王敏, 王瑾. 基于可见光通信室内定位的研究现状与发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100001.
- [2] Rahaim M B, Vegni A M, Little T D C. A hybrid radio frequency and broadcast visible light communication system [C] // *IEEE GLOBECOM Workshops*, 2011: 792-796.
- [3] Zhang H, Chen C Y. The cause analysis and solutions of VLC channel obstacle [J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(9): 57-60.
张浩, 陈长纓. 可见光通信信道障碍成因分析及解决方案[J]. *光通信技术*, 2012, 36(9): 57-60.
- [4] Tsonev D, Chun H, Rajbhandari S, *et al.* A 3 Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(7): 637-640.
- [5] Cossu G, Corsini R, Khalid A M, *et al.* Bi-directional 400 Mbit/s LED-based optical wireless communication for non-directed line-of-sight transmission[C] // *IEEE Conference of Optical Fiber Communication*, 2014: 1-3.
- [6] Mossaad M S A, Hranilovic S, Lampe L. Visible light communications using OFDM and multiple LEDs [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(11): 4304-4313.
- [7] Guan W P, Wen S S, Hu H X, *et al.* Research on visible light communication system based on hybrid modulation technique [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(11): 2125-2132.
关伟鹏, 文尚胜, 胡卉馨, 等. 基于双重调制技术的可见光通信系统研究[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(11): 2125-2132.
- [8] Fan Y Y, Deng L J. Performance of visible light communication system based on discrete sine/cosine transform DC-DMT [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106001.
樊养余, 邓莉君. 基于离散正弦/余弦变换 DC-DMT 的可见光通信系统性能研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106001.
- [9] Basnayaka D A, Haas H. Design and analysis of a hybrid radio frequency and visible light communication system [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(10): 4334-4347.
- [10] Wu M L, Guo J, Liu W K, *et al.* Scheme and implementation of bi-directional visible light communication system with LED as both optical transmitter and receiver elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0406003.
武梦龙, 郭佳, 刘文楷, 等. LED 作为收发元件的双向可见光通信系统方案及实现[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0406003.
- [11] Jenkins C, Brown J G, Li L J, *et al.* MEMS retro-phase-modulator for free-space coherent optical communications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(2): 330-335.
- [12] Ziph-Schatzberg L, Bifano T, Cornelissen S, *et al.* Deformable MEMS mirrors in secure optical communication system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7318: 73180T.
- [13] Zhang L X, Sun H Y, Fan G H, *et al.* Progress in free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 681-691.
张来线, 孙华燕, 樊桂花, 等. 猫眼逆向调制自由空间激光通信技术的研究进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 681-691.
- [14] Geng D X, Du P F, Wang W, *et al.* Single laser free-space duplex communication system with adaptive threshold technique and BER analysis in weak turbulent atmosphere [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3950-3953.
- [15] Xu S H, Xiao S L. A novel technique for duplex communication system with a signal-light source[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(3): 447-450.
徐山河, 肖沙里. 一种新型的单光源双工通信系统[J]. *半导体光电*, 2015, 36(3): 447-450.
- [16] Qiu H, Wang J Y, Xu Z Y, *et al.* Study on the single laser full-duplex modulating retro-reflector in optical communication technology [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(12): 2314-2319.
邱灏, 汪井源, 徐智勇, 等. 单光源全双工逆向调制的光通信技术研究[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(12): 2314-2319.
- [17] Zhang P, Wang T S, Yang G W, *et al.* Performance evaluation of full-duplex free space laser communication system based on modulating retro-

- reflector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2506-2510.
- 张鹏, 王天枢, 杨国伟, 等. 全双工逆向调制回复空间光通信系统性能评价[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2506-2510.
- [18] Ren J Y, Sun H Y, Zhang L X. Free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(1): 98-102.
- 任建迎, 孙华燕, 张来线. “猫眼”逆向调制自由空间光通信技术[J]. *激光与红外*, 2017, 47(1): 98-102.
- [19] Song X Q, Wei Y C, Zhao Z X, *et al.* Research progress on hardware pre-equalization technology for high-speed visible light communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 080003.
- 宋小庆, 魏有财, 赵梓旭, 等. 高速可见光通信硬件预均衡技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 080003.
- [20] Minh H L, O'Brien D, Faulkner G, *et al.* 80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED [C] // *European Conference on Optical Communication*, 2008: 1-2.
- [21] Wang X Y, Feng X L, Zhang P, *et al.* Single-source bidirectional free-space optical communications using reflective SOA-based amplified modulating retro-reflection[J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 43-47.