

基于逆向调制的室内可见光上行链路通信系统

柯熙政, 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 针对室内可见光通信系统中全光通信链路不易实现的问题,设计并搭建了一种基于离焦型猫眼逆向调制方案的室内可见光单光源全双工通信系统。该系统上下行链路相互独立,克服了传统单光源双工通信系统需要收发两端配合通信的不利因素,无须增加额外的光源就可以实现全光链路的双工通信。实验结果表明:该系统可在3.0 m的通信距离条件下实现下行5.0 Mbit/s、上行2.0 kbit/s的数据传输。

关键词 光通信; 可见光; 逆向调制; 上行链路; 猫眼效应; 全双工通信

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020601

Indoor Visible Light Uplink Communication System Based on Inverse Modulation

Ke Xizheng, Zhang Huan

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

Abstract An indoor visible light single-source full-duplex communication system is designed and constructed based on inverse modulation of defocused cat eye aiming at hard realization problem of all-optical communication link in indoor visible light communication system. The uplink and downlink of system are independent on each other. It overcomes the disadvantage that traditional single-source duplex communication system needs coordination of transmitter and receiver at the two ends with communication, and can realize the duplex communication of all-optical link without adding additional light source. The experimental results show that the system can realize the downlink 5.0 Mbit/s and uplink 2.0 kbit/s data transmission under the condition of 3.0 m communication distance.

Key words optical communications; visible light; reverse modulation; uplink; cat eye effect; full-duplex communication

OCIS codes 060.4510; 060.5060; 060.2605; 060.2630

1 引言

可见光通信技术(VLC)因具有通信和照明双重功能而受到了广泛关注。近年来,国内外关于室内可见光通信的研究大多集中在点对点单向通信链路中的关键技术,如调制方式^[1]、编码方式^[2]、信道模型^[3]、光源布局^[4]和系统集成^[5]等。由于通信系统必须包含完整的双向通信链路,而现有的可见光上行链路解决方案主要集中在射频^[6]、红外光^[7]、可见光^[8]和无线激光^[9]等,这些解决方案大多结构复杂,且移动终端携带的移动光源会带来更多的干扰,

引起人眼不适。

逆向调制技术利用逆向调制器对入射光束进行调制并使其沿原路返回到发射端,且数据发送端无需主动光源即可完成通信过程。常见的逆向调制器(MRR)有两种:角反射器 MRR 和猫眼 MRR^[10]。角反射器 MRR 由角反射器和光调制器组成,通过在角反射器的入瞳处设置透射式光调制器,改变反射光信号的强度实现逆向调制。猫眼 MRR 由聚焦透镜和调制反射器构成,将调制反射器放置于猫眼逆向反射器的焦平面处,通过改变反射面的反射率或反射面的离焦量,控制反射光的强度实现逆向调

收稿日期: 2017-08-18; 收到修改稿日期: 2017-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(61377080,60977054)、陕西省重点产业创新链项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

作者简介: 柯熙政(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

* 通信联系人。E-mail: zhas1225@163.com

制。2004年 Shay 等^[11]采用角反射器和液晶调制器搭建了全双工激光通信系统,其正向链路使用圆偏振(CPK)调制,逆向链路使用频移键控(FSK)子载波调制格式,在地面和卫星之间搭建了通信速率 10 kbit/s 的链路。2010年 Goetz 等^[12]报道了采用角反射器阵列作为逆向调制元件的调制系统,并讨论了该系统在危险物处理和无人机控制等领域的应用。2011年王静等^[13]使用 1523 nm 激光源和压电陶瓷伸缩材料的猫眼逆向调制系统实现了通信速率为 600 bit/s 的逆向激光通信链路。2015年邱灏等^[14]采用正向链路开关键控(OOK)和逆向链路幅度调制(AM)的调制方式进行了单光源全双工通信实验。2016年孙艳荣等^[15]研究了猫眼离焦结构参数与调制反射光斑半径和功率密度的关系。目前国内对逆向调制光通信技术的研究大多集中于理论研究和通信链路仿真,并且主要应用于自由空间光通信(FSO)中,在室内可见光通信中使用逆向调制技术实现实时通信的研究报道较为鲜见。

本文利用离焦型猫眼逆向调制器构建室内 VLC 中的上行通信链路,设计了一套采用单向光源的全双工通信系统,简化了室内 VLC 上行通信链路的光源^[16],降低了系统实现的复杂度。通过实验

证明:该系统数据传输稳定,上、下行链路间无干扰,有效地解决了室内可见光通信系统中数据回传的问题。

2 系统结构及原理

2.1 系统结构

室内可见光单光源全双工通信系统由主动端和逆向端两个部分组成。如图 1 所示,主动端由 LED 及其驱动电路、光电接收电路、信号处理电路、光学透镜组、下行链路调制器、上行链路解调器以及通信终端组成。逆向端由猫眼逆向调制器、光电接收电路、下行链路解调器、上行链路调制器以及通信终端组成,上行信号为 FSK,下行信号为四进制差分相移键控(DQPSK)。单光源全双工通信系统的工作过程如下:下行链路数据经调制后加载到 LED 上,驱动 LED 发出调制光信号,在逆向端下行光信号由光接收电路接收后转换为电信号,由解调器解调出下行链路数据。逆向端在进行光接收的同时,利用猫眼逆向调制器将上行链路信号调制到下行光信号上并反射回主动端,主动端光接收电路接收到二次调制后的光信号,发送至信号处理电路,提取出上行链路信号,并由解调器解调,从而实现全双工通信。

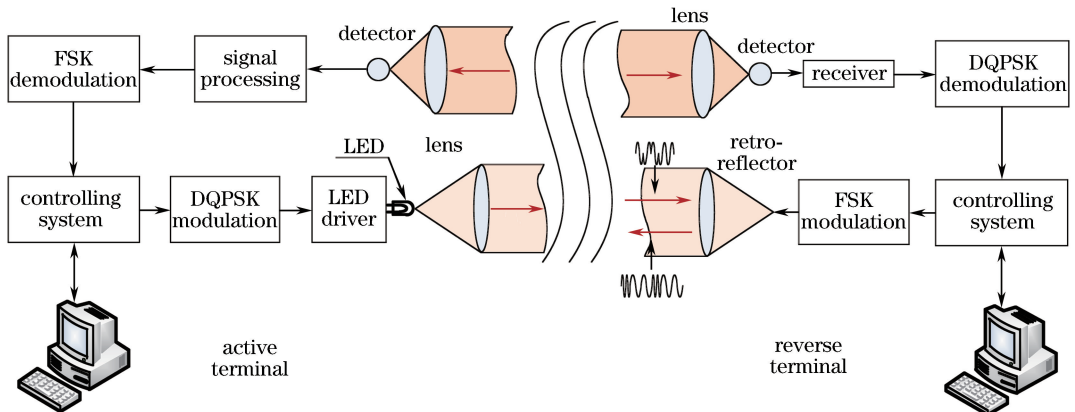


图 1 可见光单光源全双工通信系统框图

Fig. 1 Block diagram of visible light single-source full-duplex communication system

2.2 猫眼逆向调制原理

本系统中所使用的逆向调制器为离焦型猫眼 MRR,与角反射器 MRR 相比,具有视场角大、结构简单的优点,适用于室内可见光通信这种光束发散角较大的通信系统。离焦型猫眼逆向调制器由聚焦透镜和调制反射器组成,其中调制反射器使用镀膜反射膜的压电陶瓷片。通过给压电陶瓷片施加不同频率的驱动信号,控制反射膜在透镜焦平面的离焦量,对返回光信号强度大小产生影响,实现逆向调制。

借鉴逆向调制自由空间光通信中回波信号功率计算公式,给出逆向调制室内可见光全双工通信系统中主动端接收到的回波功率 P_{rec} 的计算公式^[17],即

$$P_{\text{rec}} = \frac{PD_{\text{rec}}^2 D_{\text{mr}}^2 \tau_{\text{tra}} \tau_{\text{rec}} \tau_{\text{mr}}^2 \rho_{\text{mod}}}{\pi^2 r^4 \theta^2 \left(\theta + \frac{2dD_{\text{mr}}}{f^2} \right)^2}, \quad (1)$$

式中, P 为主动端 LED 发射功率; D_{rec} 为接收光学系统口径; D_{mr} 为逆向调制端光学系统口径; τ_{tra} 为发射光学系统透光率; τ_{rec} 为接收光学系统透光率; τ_{mr}

为调制光学系统的透光率; ρ_{mod} 为逆向调制器反射率; d 为逆向调制器离焦量; θ 为主动端光束发散角; r 为通信距离; f 为猫眼系统透镜焦距。图 2 为离焦型猫眼逆向调制器等效模型。

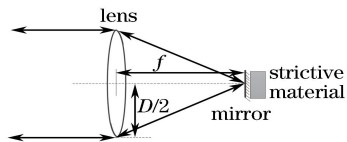


图 2 离焦型猫眼逆向调制器等效模型

Fig. 2 Equivalent model of defocused cat eye inverse modulator

2.3 单光源全双工通信原理

单光源全双工通信的原理是利用下行链路光信号作为载波,将上行链路信号通过逆向调制器加载到下行光信号上并反射回主动端,实现上行传输过

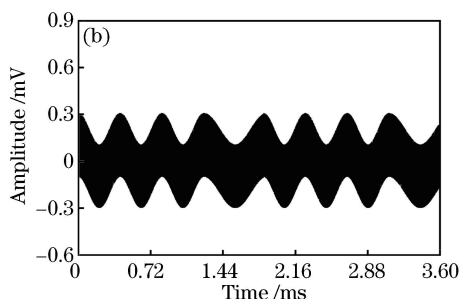
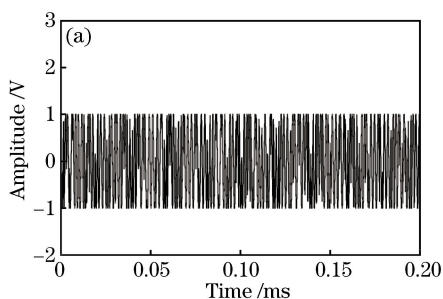


图 3 调制信号图。(a)一次调制信号;(b)二次调制信号

Fig. 3 Modulation signal diagram. (a) Primary modulation signal; (b) secondary modulation signal

3 硬件设计

3.1 LED 驱动电路设计

LED 驱动电路的作用是将调制信号调制到 LED 上。商用大功率白光 LED 的调制带宽通常较低,驱动电路的一个重要作用是扩展 LED 的调制带宽^[21]。LED 驱动电路包括偏置和调制两个部分。偏置电路由一个恒流源构成,通过设置恒流源输出电流的大小,控制 LED 的静态工作点,使 LED 稳定工作在线性区间,保证输出信号无失真。调制电路将现场可编程门阵列(FPGA)产生的信号放大并转换为电流信号,同时对调制信号进行预均衡,以提高 LED 调制带宽。从调制电路输出的交流信号和偏置电路输出的直流信号,通过 Bias-T 电路叠加到一起,共同驱动 LED 发光。图 4 为 LED 驱动电路原理图,C 为电容,R 为电阻。图 4 中由 AD8066 及其外围 C1、R1、R2、R3 等组成了同相放大电路,对输入的交流信号幅度进行放大。由 BUF634 缓冲器和外围 C2、R4 构成了电流放大电路,对交流信号的电

程。整个过程涉及两次调制^[18-19],一是在主动端对光源进行内调制,将下行链路信号加载于光载波上;二是在逆向端利用逆向调制器对接收到的下行光信号进行再调制,将上行链路信号加载于逆向反射光束上。为了保证通信效果,上、下行链路应选择不同的调制方式及不同的载波频率,从而主动端根据频谱差异从二次调制信号中分离出上行链路信号^[20]。图 3 为一次和二次调制信号图,其中主动端发送 DQPSK 信号,逆向端发送 FSK 信号。图 3(a)为一次调制信号,图 3(b)为二次调制信号。从图中可以看出:上行 FSK 信号调制到下行 DQPSK 信号的幅度上,其载波正是下行链路信号。通过在主动端设置合理的带通滤波参数,从二次调制后的信号中提取出上行链路信号并解调,即可实现全双工通信。

流进行放大,提高了其驱动 LED 的能力。

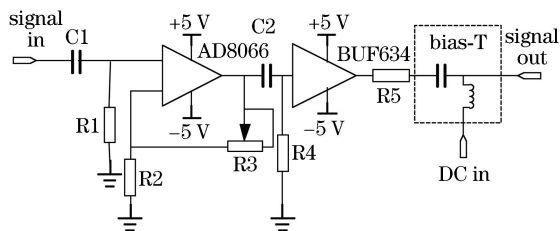


图 4 LED 驱动电路

Fig. 4 LED driver circuit

3.2 光电接收电路设计

光电接收电路由光电二极管、互阻放大器、滤波电路和二级放大电路组成。图 5 为光电接收电路原理图。其中由 S5971 光电二极管、OPA847 放大器及其外围电容电阻构成了光电转换电路,由 C2 和 R2 组成一阶无源高通滤波器,而二级放大电路采用 THS3091 及其外围附属元件构成。当光信号输入时,首先通过聚焦透镜将光信号会聚到光电二极管上,利用光电二极管将光信号转换为电流信号,在后级电路中采用互阻放大电路将该电流信号转换为电

压信号。由于调制端偏置电流源和背景光的影响,电压信号中还存在直流分量干扰,利用高通滤波电路将该信号中的直流干扰滤除。经过滤波后的信号再经由二级放大器放大,发送给后级电路处理,完成光电接收。

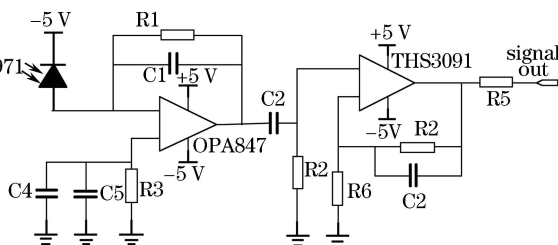


图5 光电接收电路

Fig. 5 Photoelectric receiving circuit

3.3 信号处理电路

主动端接收到的光信号是经过逆向端二次调制后的光信号,信号中既含有下行光信号,又含有逆向端返回的上行链路信号,需要从混合的信号中分离出上行链路信号。反射回主动端的光信号经过光电接收电路接收后,经过带通滤波器,滤除下行高速信号,得到只有上行分量的FSK信号。为了能在解调端获得更大的增益,还需要在滤波电路后增加电压放大电路,将信号放大。放大后的信号经模数转换电路采样后,由FPGA进行解调。图6为信号处理电路原理图。其中由两块LM358分别构成了两级放大电路,在两级放大电路间,由R1、C1、R4和C2构成二阶无源带通滤波器,用以从二次调制后的信号中提取出上行链路信号。

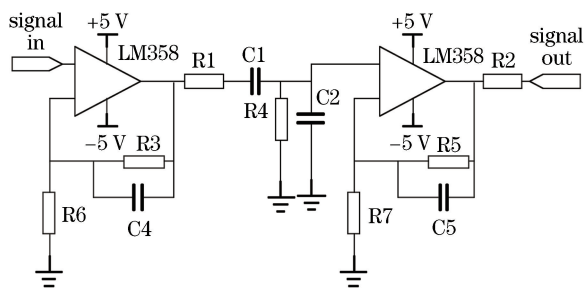


图6 信号处理电路原理图

Fig. 6 Schematic of signal processing circuit

4 实验结果与分析

室内可见光单光源全双工通信实验平台如图7所示。主动端光源为额定功率3W的商用大功率白光LED(Xlamp-Q5,CREE),实验中LED的偏置电流设置为400mA,调制电流设置为100mA。采用直径为25mm、焦距30mm的正透镜进行聚光发射,调整准直透镜和LED的相对位置,使发射光束的发散角在 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 间变化,以适应不同的通信距离。光电探测器选用固定增益光电探测器(PDA-10A型),响应波长为200~1100nm,带宽为159MHz。采用直径为50mm、焦距为70mm的正透镜对上行光信号聚焦。逆向端猫眼逆向调制器的聚焦透镜选用直径为70mm、焦距为90mm的正透镜,调制反射器使用直径为27mm的压电陶瓷片,响应频率范围为2~20kHz。光电探测器采用PIN光电二极管(S5972,滨松),响应波长为320~1000nm,峰值波长为800nm,带宽500MHz,使用直径为50mm、焦距为90mm的正透镜对下行光信号进行会聚。

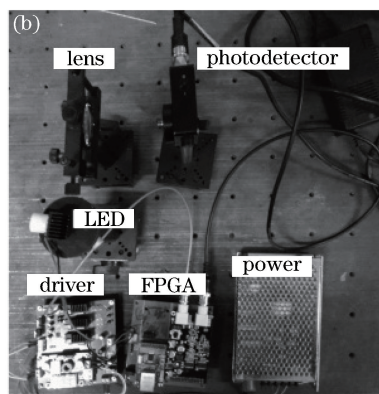
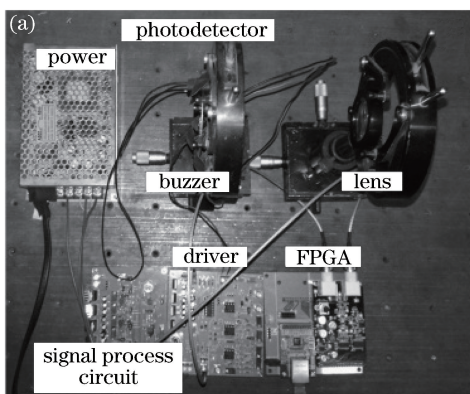


图7 逆向调制室内可见光全双工通信实验平台。(a)逆向端;(b)主动端

Fig. 7 Inverse modulated indoor visible light full-duplex communication system. (a) Reverse terminal; (b) active terminal

作为室内可见光通信,既要满足通信要求,又要兼顾室内照明效果;同时,在通信实物系统中,成本也是一个关键的考虑因素。实验中下行链路使用

DQPSK的调制格式,载波速率为5.0MHz,数据速率为5.0Mbit/s。与正交频分复用(OFDM)、离散多音调制(DMT)等高速调制技术^[22]相比,DQPSK

具有便于实现、部署成本低的优点。由于其固有属性,压电陶瓷片对信号相位变化不敏感,对不同频率的驱动信号响应幅度也不同,上行链路信道中存在较多噪声干扰,FSK 调制具有良好的抗噪声和抗衰减性能。为了提高上行链路的抗干扰能力,选择 4FSK 作为上行链路的调制格式。实验中上行链路使用 4FSK 的调制格式,采用 4 个不同频率的载波 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 代表不同的码元组合:00- f_1 、01- f_2 、10- f_3 、11- f_4 ,其中 $f_1 = 4$ kHz、 $f_2 = 8$ kHz、 $f_3 = 16$ kHz、 $f_4 = 20$ kHz。数据速率为 2.0 kbit/s。采用 EP4CE22F17C6 FPGA(Cyclone IV 系列,Altera 公司)作为主控芯片,在 FPGA 中设计数字式 DQPSK 调制解调器和 FSK 调制解调器,结合模数和数模转换硬

件模块,实现下行链路信号和上行链路信号的调制与解调,整个系统通过以太网接口与外部进行通信。由于 LED 发出的光束发散角较大,逆向端的光接收模块和逆向调制器并排放置在光平面上,使逆向端可以同时进行光电接收和逆向调制,简化了系统光路。

搭建实验平台后,在主动端利用摄像头采集视频信息并完成编码后,经下行通信链路发送给逆向端,逆向端完成解调后可以在计算机上实时看到摄像头采集到的视频。回传的数据由串口发送给逆向端,经逆向端调制后通过上行链路发送回主动端,在主动端解调出的回传数据在计算机的串口调试助手上显示,实现单光源的全双工通信。图 8 为应用该系统进行视频传输实验。

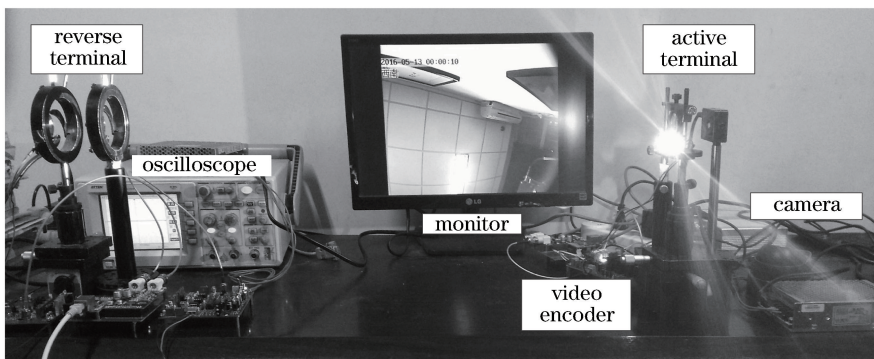


图 8 视频传输实验

Fig. 8 Video transmission experiment

实验中对上下行通信链路中的信号进行采集分析,图 9 为下行传输链路中的信号图。其中图 9(a)为主动端发送的下行链路 DQPSK 调制信号;图 9(b)为逆向端的上行链路调制信号。从图 9 中可看出:下行链路信号传输质量良好,完全满足逆向端解调需要。图 10 为经过逆向端二次调制后的信号及其功率谱(PSD),从图 10(a)中可以看出:上行链路的信号已经调制到下行光信号的包络上,其载波正是下行高频信号。图 10(b)为经过二次调制后信号的功率谱,可以看到经二次调制后的信号功率谱中包含了两个峰值,其中 Downlink 为下行链路高频信号的峰值,Uplink 为上行链路信号的峰值。对该功率谱分析可知:在上行接收端可利用带通滤波器将高低频信号分离,滤除高频的下行信号分量,提取出低频的上行信号。图 11 为上行链路 4FSK 调制信号,其中图 11(a)为逆向端加载到逆向调制器上的信号,图 11(b)为主动端从二次调制的信号中提取出的上行链路信号。对比图 9(a)、图 9(b)、图 11(a)和图 11(b)可知:通过在主动端设置合适的

带通滤波器参数,可以从二次调制信号中分离出上行链路信号,实现两条链路间无干扰通信。

在实验室环境中,分别在下午和晚上对可见光全双工通信系统在 0.5~4.0 m 的通信距离上进行测试,测试中上行链路通信速率为 2.0 kbit/s,下行链路通信速率为 5.0 Mbit/s。误码率(BER, R_{BE})与通信距离的关系如图 12 所示。

从图 12 中可看出:当通信距离为 3.0 m 时,在白天和夜晚不同的背景光条件下,下行链路的误码率达到 7.4×10^{-7} ,上行链路误码率小于 4.2×10^{-4} ,满足了通信需求。图 12 中下行链路在通信距离小于 0.5 m 时误码率较高,这是因为近距离情况下光照强度过大,超过了光电探测器的饱和阈值,使探测器无法正常接收信号。通过调节主动端 LED 的偏置电流,改变下行光强度,即可正常接收信号。从上述实验结果可以看出:通过对单向光源进行两次调制,可实现上下行两条链路间独立无干扰的全双工通信,验证了采用逆向调制技术解决室内可见光通信中上行链路问题的有效性。

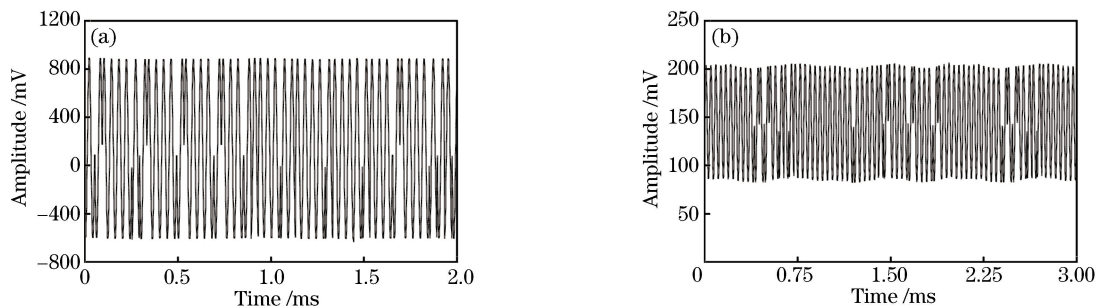


图9 下行通信链路信号。(a)主动端发送信号;(b)逆向端接收信号

Fig. 9 Downlink communication signal. (a) Active terminal sending signal; (b) reverse terminal receiving signal

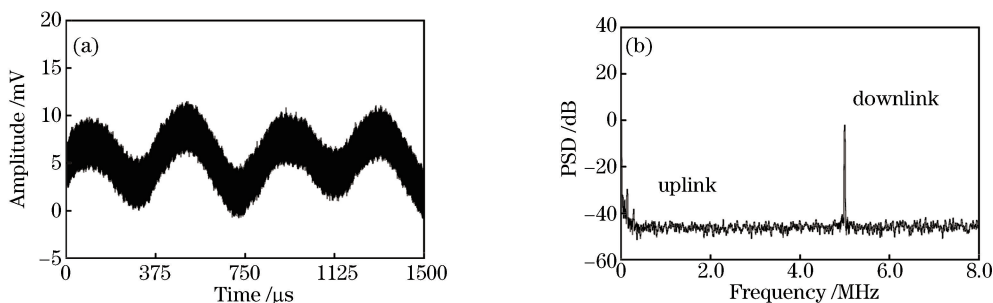


图10 二次调制后信号及功率谱。(a)二次调制后信号;(b)信号功率谱

Fig. 10 Secondary modulation signal and power spectrum. (a) Secondary modulation signal; (b) signal power spectrum

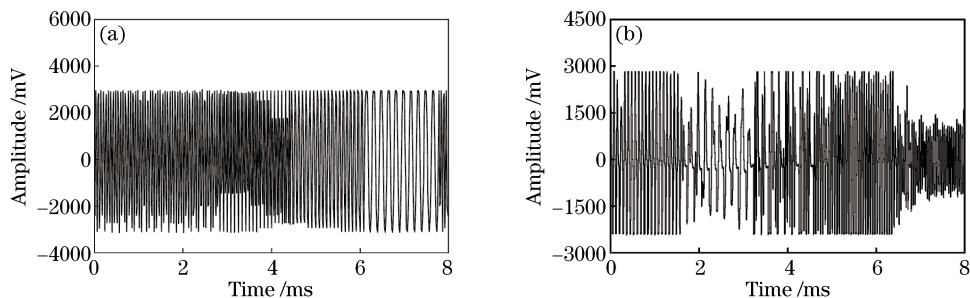


图11 上行链路信号。(a)逆向端发送信号;(b)主动端提取出的信号

Fig. 11 Uplink signal. (a) Signal of reverse terminal; (b) signal of active terminal

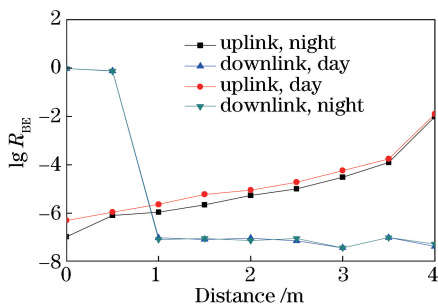


图12 BER与传输距离关系

Fig. 12 Relation of BER and transmission distance

5 结论

本文设计了一种基于逆向调制技术的室内可见光全双工通信系统,并搭建了实验平台。该系统采

用逆向调制技术简化了室内可见光通信系统的上行链路,使其无需额外的光源,具有无需频谱许可、保证人眼安全等可见光通信的内在优点,且系统结构的复杂度大大降低。通过搭建可见光单光源全双工通信实验平台,实现了下行通信速率 5.0 Mbit/s,上行通信速率 2.0 kbit/s 的全双工通信,验证了采用逆向调制技术实现可见光通信上行链路的有效性。受限于逆向调制器件的影响,实验中上行通信链路速率不高,在下一步工作中应采用更高调制带宽的逆向调制器件,提高上行通信链路速率,使采用逆向调制技术的可见光通信上行链路进一步实用化。

参考文献

- [1] Mossaad M S A, Hranilovic S, Lampe L. Visiblelight

- communications using OFDM and multiple LEDs [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(11): 4304-4313.
- [2] Kang Y, Ke X Z. Multi-dimensions encoding scheme for visible light communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0205001.
亢焯, 柯熙政. 可见光通信中的多维编码 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0205001.
- [3] Jia K J, Hao L, Yu C H. Modeling of multipath channel and performance analysis of MIMO-ACO-OFDM system for indoor visible light communications [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0706005.
贾科军, 郝莉, 余彩虹. 室内可见光通信多径信道建模及 MIMO-ACO-OFDM 系统性能分析 [J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0706005.
- [4] Wang J A, Che Y, Lü C, *et al.* LED layout for indoor visible light communication based on energy optimization [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0806003.
王加安, 车英, 吕超, 等. 基于能量最优的室内可见光通信 LED 布局 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0806003.
- [5] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
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): 0300001.
- [6] 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, 10(4): 792-796.
- [7] 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]. Optical Fiber Communication Conference, 2014: 14546367.
- [8] Chi N, Wang Y Q, Wang Y G, *et al.* Ultra-high-speed single red-green-blue light-emitting diode-based visible light communication system utilizing advanced modulation formats [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1): 010605.
- [9] Zheng Z, Liu L, Hu W W. Study on the uplink link of visible light communication [J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(6): 8-11.
郑重, 刘璐, 胡薇薇. 应用于可见光通信的上行链路方案探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(6): 8-11.
- [10] Sun H Y, Zhang L X, Zhao Y Z, *et al.* Progress of free-space optical communication technology based on modulating retro-reflector [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040004.
孙华燕, 张来线, 赵延伸, 等. 逆向调制自由空间激光通信技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040004.
- [11] Shay T M, MacCannell J A, Garrett C D, *et al.* First experimental demonstration of full-duplex communication on a single laser beam [C]. SPIE, 2004, 5160: 265-271.
- [12] Goetz P G, Rabinovich W S, Mahon R, *et al.* Modulating retro-reflector lasercom systems for small unmanned vehicles [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(5): 986-992.
- [13] Wang J, Wang Y F, Gao C M, *et al.* Applications of piezoelectric technology in retro-identification system [J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(12): 36-39.
王静, 王亚非, 高椿明, 等. 压电技术在逆向识别系统中的应用 [J]. 无损检测, 2011, 33(12): 36-39.
- [14] Qiu H, Wang J Y, Xu Z Y, *et al.* Study on single laser full-duplex modulating retro-reflector in optical communication technology [J]. Journal of Optoelectronic • 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.
- [15] Sun Y R, Ke X Z, Li Y H. Analysis of influence factors of retro-reflect modulation reflected optical characteristics [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 0122002.
孙艳荣, 柯熙政, 李元虎. 影响逆向调制反射光特性的因素分析 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0122002.
- [16] 柯熙政, 雷思琛. LED 可见光通信上行链路的调制系统及其建立方法: CN201510056018.8 [P]. 2015-02-02.
- [17] Rabinovich W S, Goetz P G, Mahon R, *et al.* Performance of cat's eye modulating retro-reflectors for free-space optical communications [C]. SPIE, 2004, 5550: 104-114.
- [18] Wang X, Feng X, 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.
- [19] Chand N, Eteson B, Taskalos D. Full-duplex laser communication using single wavelength from an optical transmitter: US8417125 [P]. 2013-04-09.
- [20] 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.

- [21] 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.

- [22] 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.