

LED 作为收发元件的双向可见光通信系统方案及实现

武梦龙¹, 郭佳¹, 刘文楷¹, 张民²

¹北方工业大学电子信息工程学院, 北京 100144

²北京邮电大学信息光子与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 随着可见光通信系统研究的不断发展, 解决可见光通信上行通信链路缺失的问题日益引起重视。建立双向可见光通信系统, 意味着在系统两端的收发器件上需要同时实现光电转换与电光转换。提出了以发光二极管(LED)同时作为光信号收发元件的实时双向可见光通信系统方案, 设计了时分复用方式的 LED 双向工作控制机制, 实现了双向可见光通信。在不同的收发端仰角下进行了实时双向通信系统的实验, 实测结果表明本系统方案仅以 LED 作为光收发元件、不需严格对准和中继放大即可实现 2 m 以上距离、8 Mb/s 速率的实时双向可见光通信。

关键词 光通信; 实时可见光通信系统; 基于 LED 的光接收方法; LED 双向工作控制

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0406003

Scheme and Implementation of Bi-Directional Visible Light Communication System with LED as Both Optical Transmitter and Receiver Elements

Wu Menglong¹, Guo Jia¹, Liu Wenkai¹, Zhang Min²

¹ College of Electronic Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

² State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract With the continuous development of the research in visible light communication system, it is highlight to solve the problem of lacking uplink communication. The bi-directional visible light communication system means that both ends of the system need to realize photoelectric conversion and electro-optical conversion at the same time. In this paper, we propose a real-time bi-directional visible-light communication system scheme with light-emitting diodes (LEDs) as both optical signal transmitter and receiver, in which we design the mechanism of controlling LED bi-directional work by the way of time-division multiplexing to achieve a bi-directional visible light communication. The real-time bi-directional communication system experiments are done under the different elevation angles of transmitter and receiver. The results show that the system scheme can realize real-time bi-directional visible light communication at a distance of more than 2 m and a transmission rate of 8 Mb/s only with LED as optical transmitter and receiver, without strict alignment and relaying amplification.

Key words optical communications; real-time visible light communication system; method of receiving optical signal based on LED; bi-directional communication control based on LED

OCIS codes 060.4510; 060.6718; 060.4080; 060.4230

1 引 言

近年来,随着发光二极管(LED)作为下一代照明光源的广泛应用,基于 LED 的可见光通信

(VLC)技术备受关注,由于其具有不需使用许可证、无电磁辐射、抗电磁干扰、能效高等优点,在目前无线频谱资源严重紧缺情况下,是实现短距离宽带通信的有效技术手段,甚至被纳入 5G 移动通信技

收稿日期: 2017-07-19; 收到修改稿日期: 2017-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61372119)

作者简介: 武梦龙(1972—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事无线光通信方面的研究。

E-mail: wumenglong@126.com

术体系和网络标准^[1-6]。然而,基于 LED 的 VLC 仍面临一些关键技术问题需要解决,如下行链路的实现是以照明 LED 为光源,以光电二极管(PIN)为接收元件,而上行链路的实现方法存在较大的争议。上行链路已有的解决方案主要有两种:一种是上行链路完全复制下行链路的配置和设施,进而构成上下行完全对称的双向通信系统^[7],但问题是这种方案不仅设备多,而且需对照明系统做较大改造,系统成本和实施成本都较高;另一种解决方案是上行链路采用无线保真网络(WiFi)等常规无线通信手段,但问题是这种方案不仅没有避开系统复杂的问题,而且偏离了 VLC 的无电磁辐射绿色通信的初衷。

针对上述问题,若能以照明 LED 同时作为下行链路光源和上行链路光接收元件,可明显简化对照明系统的改造,大幅减少双向 VLC 系统成本,提高 VLC 的实用价值。目前以 LED 作为光收发元件的研究还很少^[8-10],尚存在一些问题有待解决:首先是通信距离过短,已有的研究方案大都在通信双方之间放置中继模块来增加通信距离,失去了无线光通信简单灵活的特点,并且增加了噪声;其次是已有的研究尚未给出完整的通信控制机制和模块,需要外加信号控制 LED 的工作状态^[11]。

本文提出并实现了以 LED 同时作为光收发元件的实时双向可见光通信系统方案,并以硬件实现双向通信控制和快速切换模块。基于时分复用(TDM)机制实现 VLC 系统的双向控制,通过硬件实现快速切换 LED 的工作模式,使其在接收光信号时能迅速得到反向偏压,进而用作较灵敏的上行链路光电探测器;搭建实验系统,进行实时通信测试与性能分析。实测结果表明,该方案无须放置中继模块即可实现不需严格对准的 8 Mb/s 速率下 2 m 以上距离的实时双向通信。

2 工作原理与系统设计

实时双向可见光通信系统设计框图如图 1 所示。系统由两个收发端组成,LED 同时作为光收发元件,控制与判决模块提供系统状态改变的逻辑指令,链路选择模块实现 LED 工作方式的快速切换,发送模块和接收模块实现电光转换与光电转换。当 LED 为发送状态时,控制与判决模块通知链路选择模块为 LED 提供适合照明和通信的正向偏压,进而把要发送的信号经发送模块送入 LED;当 LED 为接收状态时,控制与判决模块通知链路选择模块为 LED 提供适当的反向偏压,进而 LED 用作光信号

探测器,将接收到的光信号转变为电流信号,并经接收模块转变为电压信号,最终进入控制与判决模块进行处理。

要实现预期的功能,对系统中的器件有如下要求:1) LED 的工作状态能在发光源和光灵敏度探测器之间任意切换;2) 发射和接收模块能够在高转换率的前提下高速完成电光或光电转换;3) 链路选择模块能够根据输入电压的变化快速切换功能电路;4) 控制与判决模块能够在规定的时序给模块选择电路输出相应的控制信号,并在接收到信息后快速处理,给出反馈信号。

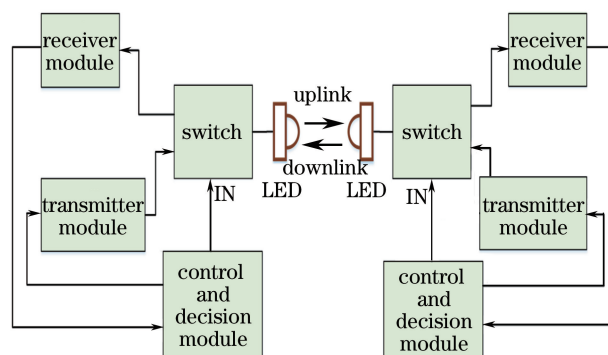


图 1 实时双向可见光通信系统设计原理框图

Fig. 1 Block diagram of real-time bi-directional visible light communication system

2.1 LED 代替光电探测器的原理

目前白光 LED 主要分为两种:单色 LED 灯是利用黄色荧光粉将蓝光 LED 所发的蓝光转换成双波长的白光;RGB 混合白光 LED 则是将红光、绿光、蓝光按照一定的比例结合成白光^[12]。其中只有单色的高亮度(HB)的 LED 才可以用作光电探测器,且 LED 用作光信号探测器时,需要在 LED 两端加载反向电压。在不超过该 LED 反向击穿电压的前提下,反向电压越大,LED 产生的反向电流越大,性能越好^[13]。

本方案选用型号为 C503B-RAN-CA0B0AA1 的 LED 作为光收发元件。通过测试得到 LED 正向伏安特性曲线,如图 2(a)所示,当 LED 两端的正向电压 V_F 在 2 V 左右时,LED 正向电流 I_F 为 10 mA 左右;当电压增加到 2.5 V 时,LED 正向电流达到 70 mA。反向伏安特性曲线如图 2(b)所示,从图中可见,该 LED 的反向击穿电压 V_r 约为 42 V。LED 在用作光源和光电探测器的频谱特性如图 3 所示,该 LED 作为光源时的发射频谱峰值在 630 nm 处,而作为光电探测器时的光灵敏度频谱峰值在 595 nm 处,且该 LED 作为光电探测器时的光灵敏

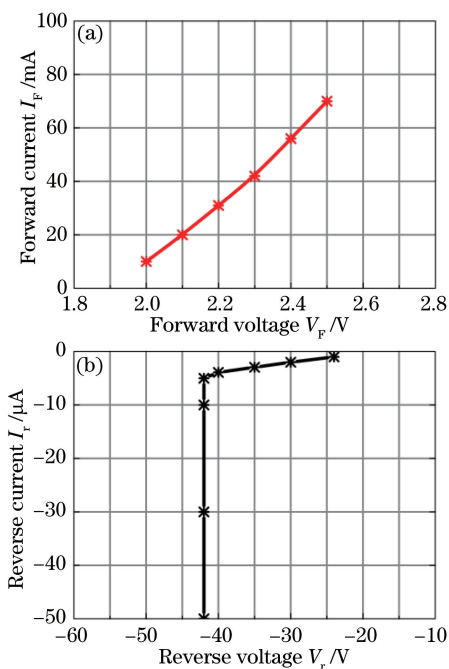


图 2 (a) LED 正向伏安特性曲线;
(b) LED 反向伏安特性曲线

Fig. 2 (a) Forward voltammeter curve of LED;
(b) reverse voltammeter curve of LED

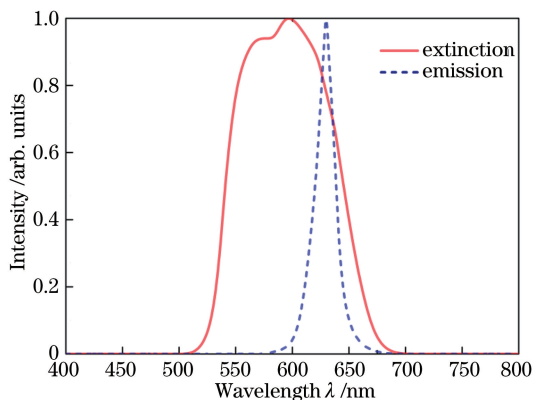


图 3 LED 用作光源与光电探测器的频谱

Fig. 3 Spectrum of the LED as the light and the photodetector
度频谱有效范围覆盖了其用作光源时的发射频谱峰位置。

2.2 LED 收发模块的设计与实现

LED 作为光收发元件时,双向通信链路不能相互干扰。因此,本方案通过发送模块、接收模块、链路选择模块的协调工作来实现预期设计目标。

发送模块的本质是 LED 驱动电路,根据图 2(a) 的 LED 正向伏安特性曲线,采用恒压源驱动,原理如图 4(a)所示,运算放大器型号为 LT1363CS8。当 LED 在反向电压的作用下用作光电探测功能时,其通过吸收光子而产生的反向电流需要转化成电压信号以便于处理,因而接收模块的本质是一个 I/V 转

换电路,电路原理如图 4(b)所示。图 4 中 R 表示电阻,C 表示电容。

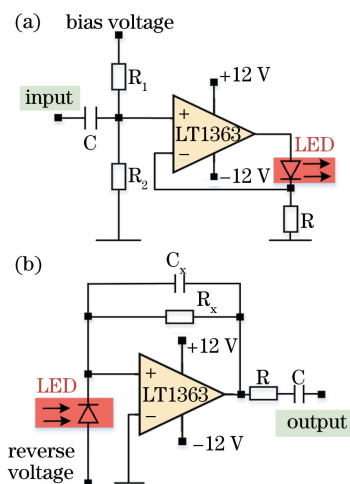


图 4 (a)发送模块原理图;(b)接收模块原理图
Fig. 4 (a) Schematic of transmitter module;
(b) Schematic of receiver module

对于链路选择模块,由于 LED 内部只有一个通道可供信号使用,因此需要在信号进入 LED 之前将发送信号与接收信号在物理链路上进行分离,以保证信号收发不会发生冲突,为此引入集成芯片 TS5A2053。TS5A2053 是一款带有使能端控制的单刀双掷开关,使能端的工作状态为低电平有效。芯片的 IN 端为电压输入端,通过改变输入端电压的大小来控制芯片之间不同节点的通断。当输入电平位于 $(V_+ \times 0.7) \sim 5.5$ V 时,为高电平输入;当输入电平位于 $0 \sim (V_+ \times 0.3)$ V 时,为低电平输入。

上述协调工作的 3 个模块实物连接图如图 5 所示,通信控制使用基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的快速逻辑指令实现。LED 与单刀双掷开关的单端连接,发送模块和接收模块分别与单刀双掷开关的双端连接。在开关工作过程中,通过控制输入端

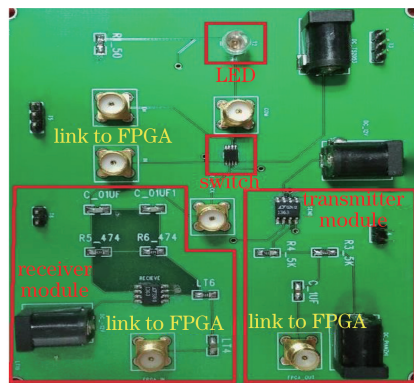


图 5 收发模块电路实物图

Fig. 5 Physical map of transmitter and receiver module circuit

电平的高低选择相应的电路与 LED 连接,从而实现链路选择功能。

信号的输入与输出端均设计为射频连接器(SMA)接头模式,避免了不必要的干扰,并且在单刀双掷开关的两侧添加了信号测试点,方便在实验过程中对信号进行检测以排查系统出错的原因。整个电路板的电源输入端口均采用直流(DC)电源插座的形式,减少了插针式电源接口对电路板内信号的干扰。

2.3 双向通信控制及模块实现

LED 无法同时发送与接收信号,需要通过时分复用的方式使 LED 工作在半双工模式下。为此设计了通信控制协议来规范系统中双方的通信行为,通信协议流程如图 6 所示。

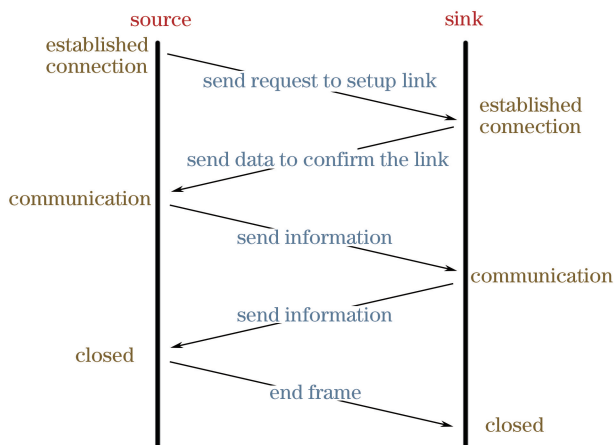


图 6 通信协议流程图

Fig. 6 Flow chart of communication protocol

初始阶段,通信双方的模块电路均处于默认接收状态。整个通信过程中信息的处理以及工作状态的切换均由控制与判决模块来触发完成。

一个成功、完整的通信过程表述如下。

1)开始时,信源将工作模式改变为发送状态,并发送一个请求信息给信宿,信息发送完毕后将自身的工作模式还原为接收状态。

2)当信宿收到信息后,由控制与判决模块进行处理,若判断为通信请求信息,则将工作模式变为发送状态,并发送一个确认信息,信息发送完毕后还原为接收状态。

3)信源收到反馈信息后,由控制与判决模块进行处理,若判断为通信确认信息,则开始发送真正的通信信息。每次信息发送完毕之后,通信参与者都需要还原为接收状态。

4)当需要结束通信时,可由任意一方发送一帧结束通信的信息,另一方在收到该结束信息之后不

做任何处理,保持接收状态。

通信过程中若出现以下情况之一,则通信链路建立失败。

1)通信链路中没有通信参与者发出请求信息,此时通信双方一直处于初始状态。

2)请求信息已经发送,但信宿未收到信息或收到的信息不完整,进而无法产生确认信息。此时,信宿将保持接收状态,直到收到完整的请求信息。

3)信源未能收到确认信息或收到的确认信息不完整,这种情况下,信源将在一定的等待时间后重新发送请求信息,以期建立新的通信链路。

上述协议通过对通信双方的身份确认,使得除传输过程中存在干扰信息或逻辑程序设计不当以外,不存在其他使通信链路建立失败的原因。

方案中所发送的通信请求信息、确认信息、结束信息均由不同组数的 7 bit 巴克码组成。而在通信过程中,每一帧都采用帧头与净荷结合的方式来实现上述交互过程,帧头采用 13 bit 巴克码表示,净荷装载交互信息并采用 13 bit PN(Pseudo-Noise)序列表示。

上述通信控制均以基于 FPGA 的快速逻辑指令来实现,以保证通信模式的快速转换。不发送信息时,系统默认接收状态,此时链路选择模块的 IN 端始终位于低电平。发送信息时,FPGA 给 IN 端高电平,使其切换为发送状态并发送信息,发送完毕后 FPGA 给 IN 端低电平,使其恢复接收状态。接收到信号的一端重复上述步骤来发送反馈信号。

3 实验装置

为了验证方案及双向通信控制机制的有效性,搭建了实时双向可见光通信实验系统,如图 7 所示。通信双方的结构相同,主要由发送模块、接收模块、链路选择模块、控制与判决模块、LED 及透镜组成。其中,控制与判决模块采用 FPGA 开发板(Cyclone

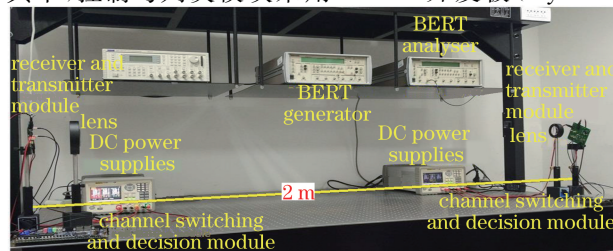


图 7 实时双向可见光通信系统实验平台

Fig. 7 Experiment platform of real-time bi-directional visible light communication system

IV 4CE115, Altera 公司)来开发,由 Verilog 代码实现逻辑功能,并用 Quartus II 软件实现分析综合功能;发送模块和接收模块如图 4 和图 5 所示,发送驱动电路和 I/V 转换电路选用 LT1363CS8 运算放大器(凌力尔特公司);链路选择模块的核心元件是一款带有使能端控制的 TS5A2053 单刀双掷开关);光信号收发元件采用型号为 C503B-RAN-CA0B0AA1 的 LED,视场角为 15° ,前向电流为 15 mA,反向电压为 5 V,发光强度为 12 cd;透镜的作用主要是对光路进行矫正,聚焦光信号,减少由于 LED 辐射造成的信号能量的损失。

通信双方所发送的伪随机信号由误码仪(gigaBERT 1400 GENERATOR, 泰克公司)的两个输出端产生,接收并判决后的信号由与之相配套的 gigaBERT 1400 ANALYSER 分析仪来进行误码统计。

4 结果分析

4.1 发送、接收端性能测试

接入网设备对成本十分敏感,而无线通信设备又对功率效率很敏感,所以综合考虑成本和功率效率,调制方式选用通断键控(OOK)调制,无需特别解调。发送端波形如图 8(a)~(c)所示,发送端信号的峰峰值动态范围为 0.02~3.52 V。发送端整体的频率响应如图 8(d)所示,3 dB 的带宽为 10 MHz 左右。

接收端波形如图 9(a)~(c)所示,使用 LED 做接收端时带宽较低,因此只取时钟频率为 1, 5, 10 MHz 时的接收波形图,从图 9 中可以看出接收端信号动态范围为 $-1.41 \sim 2.59$ V。接收端整体的频率响应如图 9(d)所示,3 dB 的带宽为 0.2 MHz 左右。

4.2 系统性能测试

在可见光的室内接入或物联网互连等应用场景,典型通信距离为 2 m 左右,所以以此距离为例,测试和评价方案的性能。由于接收面积有限、光斑随着传输距离延伸扩散、透镜的光透过率为 65% 等原因,信号会衰减,衰减率约为 57%。

选定一端为信源,循环发送长度为 $2^{15} - 1$ 的伪随机序列,信息发送速率从 0.1 Mb/s 开始以 0.1 Mb/s 的步长递增,增至 1 Mb/s 之后再以 1 Mb/s 的步长递增。为保证数据采集的准确性,每一个速率测试 15 次,统计后取平均值。通过测试与计算,得到通信速率与误码性能的曲线如图 10 所示。

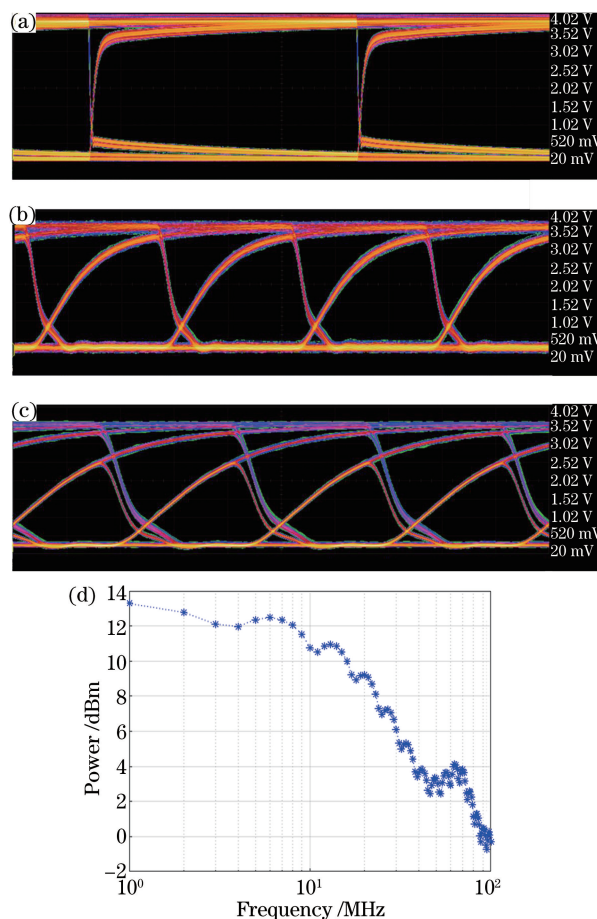


图 8 (a)(b)(c)分别为时钟频率为 1, 20, 40 MHz 时发送端的波形图; (d)发送端整体频率响应图

Fig. 8 Transmitter waveforms of clock frequencies of (a) 1, (b) 20, (c) 40 MHz; (d) frequency response of transmitter

以国际电信联盟 (ITU) 颁布的无线通信中使用前向纠错(FEC)编码的误码率(BER)门限 2×10^{-2} 量级为参考标准,方案中系统的下行通信速率为 4.38 Mb/s,上行通信速率为 3.63 Mb/s,总速率为 8 Mb/s。当固定通信速率为 3.63 Mb/s 时,上行通信误码率为 2.0×10^{-2} ,下行通信误码率为 1.48×10^{-2} 。

为不失一般性,选取市面上容易获得的两个照明 LED,其结电容存在差异,下行链路中 LED 结电容较小,在高速通信时调制特性更好,波形失真较小,而上行链路的 LED 结电容较大,通信性能较差,因此出现了上下行速率和 BER 均不同的情况。

与红外通信相比,可见光通信具有一定的灵活性,收发双方不需要严格对准。为了评价这一性能,对不同收发端仰角下的误码率进行测试。测试方法如图 11 所示,分 3 组情况对多种收发端仰角的组合进行测试。

第 1 组:以基准线为基础,固定一个 LED,另一

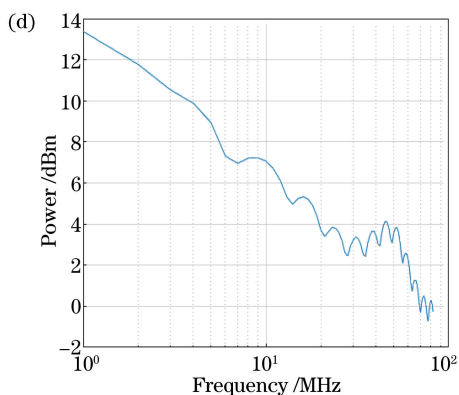
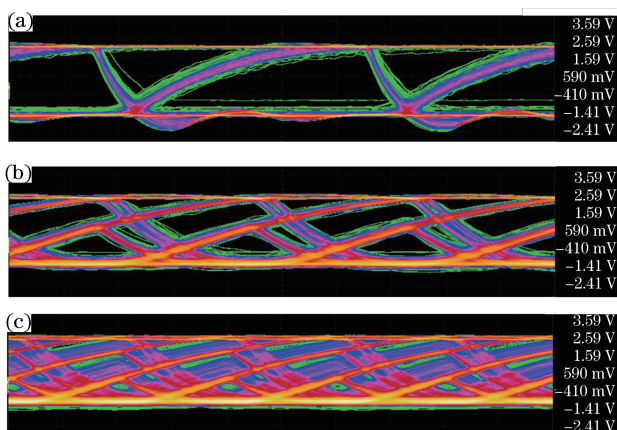


图 9 (a)、(b)、(c)分别为时钟频率为 1, 5, 10 MHz 时接收端的波形图; (d)接收端整体频率响应图

Fig. 9 Receiver waveforms of clock frequencies of

(a) 1, (b) 5, (c) 10 MHz; (d) frequency response of receiver

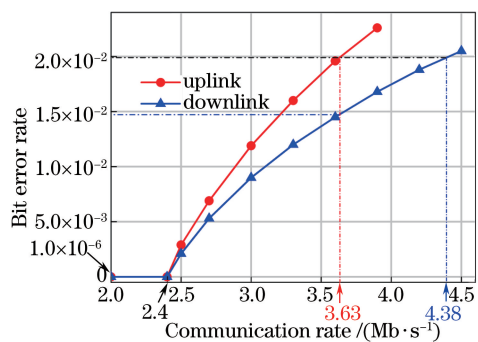


图 10 距离为 2 m 的实时双向可见光通信系统误码率实测结果

Fig. 10 Bit error rate curve of real-time bi-directional visible light communication system at a distance of 2 m

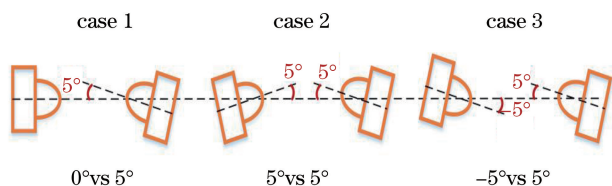


图 11 LED 摆放示意图

Fig. 11 Layout illustration of LED

个 LED 以 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 旋转;

第 2 组:以基准线为基础,将两个 LED 同时以 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 旋转;

第 3 组:以基准线为基础,一个 LED 以 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 旋转,另一个以 $0^\circ, -5^\circ, -10^\circ$ 旋转。

实验结果如图 12 所示。从图中可以看出,在收发双方没有严格对准的情况下,所设计的可见光通信系统仍可在一定的仰角范围内进行实时通信。以 ITU 颁布的无线通信中使用 FEC 编码的误码率门限 2×10^{-2} 量级为参考标准;当发送端固定时,只旋转接收端时,接收端最大仰角为 10.8° ;当发送端不固定时,对系统误码率影响较大,若发送与接收端向同方向旋转,则接收端最大仰角为 6.1° ,当发送与接收端反方向旋转时,接收端最大仰角为 3.7° 。

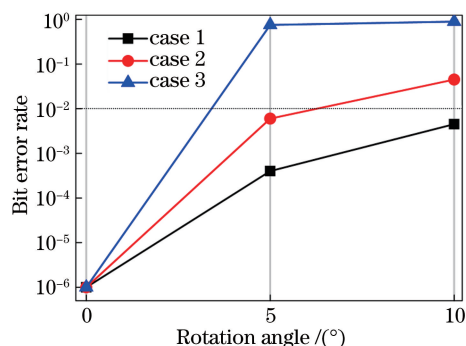


图 12 旋转不同角度时的误码率实测结果

Fig. 12 Bit error rate versus rotation angle

5 结 论

本文提出以 LED 同时作为发送端和接收端的方案,不需另外配置专用光接收装置,通过时分复用的方式对 LED 进行操作,并用一套完整的通信协议规范收发双方的通信行为,实现了基于 LED 的实时双向可见光通信,改善了上行通信性能。在不需严格对准的前提下,仅以 LED 作为光收发元件即可实现 2 m 以上距离、8 Mb/s 速率的实时双向可见光通信。设计了快速切换工作模式,不需中继模块即可实现长距离传输等技术问题,可以为兼顾照明的绿色家庭互联网或其他场合的可见光通信提供设计参考和实测依据。

参 考 文 献

[1] Chen Q R, Zhang T, Zheng W B, *et al.* Present research situation and application prospects of VLC based on white LED[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(4): 455-460, 476.

- 陈泉润, 张涛, 郑伟波, 等. 基于白光 LED 可见光通信的研究现状及应用前景[J]. 半导体光电, 2016, 37(4): 455-460, 476.
- [2] 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.
- [3] Zhao L, Peng K. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0706001.
赵黎, 彭恺. 基于白光发光二极管的室内可见光通信光源布局优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0706001.
- [4] Deng P, Kavehrad M. Real-time software-defined single-carrier QAM mimo visible light communication system[C]//IEEE International Conference on Integrated Communications Navigation and Surveillance, 2016: 16071174.
- [5] Aubida A, Ahmed T H, Mohammed T, *et al.* Adaptive receiver for visible light communication system[C]//18th International Conference on Transparent Optical Networks, 2016: 16280914.
- [6] Peng J. Connect to the network through LiFi visible light communication [J]. Shanghai Informatization, 2017(2): 20-23.
彭健. LiFi 可见光通信开灯上网[J]. 上海信息化, 2017(2): 20-23.
- [7] Shi J Y, Huang X G, Wang Y G, *et al.* Real-time bi-directional visible light communication system utilizing a phosphor-based LED and RGB LED[C]//6th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, 2014: 14824809.
- [8] Chun H, Rajbhandari S, Faulkner G, *et al.* Demonstration of a bi-directional visible light communication with an overall sum-rate of 110 Mb/s using LEDs as emitter and detector[C]//IEEE Photonics Conference, 2014: 14863005.
- [9] Kowalczyk M, Siuzdak J. VLC link with LEDs used as both transmitters and photo-detectors[C]//7th International Conference on Ubiquitous and Future Networks, 2015: 15363555.
- [10] Li S, Pandharipande A, Willems F M J. Two-way visible light communication and illumination with LEDs [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(2): 740-750.
- [11] Le T D, Seungwan J, Beongku A. Demonstration of low-complexity LED-to-LED two-way visible light communication system[C]//International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2016: 16248473.
- [12] He S Y. Research on key technologies of indoor visible light communication systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
何胜阳. 室内可见光通信系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] Kowalczyk M, Siuzdak J. Influence of reverse bias on the LEDs properties used as photo-detectors in VLC systems[C]. SPIE, 2015, 9662: 966205.