

引用本文:邓健志,徐铭君,唐超尘.可见光色分复用通信系统研究与实验[J].光通信技术,2024,48(5):14-19.

可见光色分复用通信系统研究与实验

邓健志^{1,2},徐铭君¹,唐超尘³

(1.桂林理工大学 物理与电子信息工程学院,广西 桂林 541004; 2.桂林理工大学 地球科学学院,广西 桂林 541004;
3.桂林理工大学 广西嵌入式技术与智能系统重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要:针对单色光通信不便于照明、普通白光通信频谱利用率较低的问题,设计了一个可见光色分复用通信系统。该系统在保持发光二极管(LED)正常照明功能的同时,还具备信息传递功能。在发送端,采用3种具有固定波长的LED进行调制;在接收端,使用与发送端波长相匹配的窄带滤光镜来分离各个信道的光信号。分离后的光信号经由单片光电二极管转换成电信号,这些电信号再经过与预设阈值的比较后,被微控制器接收并解码。测试结果表明:接收端的窄带滤光镜能有效区分来自3个特定波长LED的广播信号;当发送速率低于50 kHz时,眼图效果良好,能够实现稳定的通信;但当发送速率提升至50 kHz以上时,图像会出现错误色块和偏移失真。

关键词:可见光通信;色分复用;窄带滤光镜;脉冲相位编码

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2024)05-0014-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and experiment on visible light color division multiplexing communication system

DENG Jianzhi^{1,2}, XU Mingjun¹, TANG Chaochen³

(1. College of Physics and Electronic Information Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. College of Earth, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

3. Guangxi Key Laboratory Embedded Technology and Intelligent System, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the issues that monochromatic optical communication is not suitable for lighting and the frequency spectrum utilization of ordinary white light communication is low, a visible light color division multiplexing communication system is devised. The system not only maintains the normal lighting function of the light emitting diode(LED), but also possesses the function of information transmission. At the transmitting end, three types of LEDs with fixed wavelengths are utilized for modulation. At the receiving end, narrow-band filters matching the wavelength of the transmitting end are employed to separate the optical signals of each channel. The separated optical signals are converted by a monolithic photodiode into electrical signals, which are then compared with a preset threshold and received and decoded by the microcontroller. The test results indicate that the narrow-band filter at the receiving end can effectively distinguish the broadcast signals from the three specific wavelengths of the LED. When the transmission rate is lower than 50 kHz, the eye image effect is favorable and stable communication can be achieved. However, when the transmission rate is increased to more than 50 kHz, images will present wrong color blocks and offset distortion.

Key words: visible light communication, color division multiplexing, narrow-band filter, pulse phase modulation

收稿日期:2023-12-31。

基金项目:广西科技研究项目(1598007-16)资助;广西嵌入式技术与智能系统重点实验室资助。

作者简介:邓健志(1982—),男,博士生,教授,硕士生导师,主要从事可见光通信、嵌入式技术、物联网等方面的研究。主持和参与完成国家级省部级项目5项,获得授权发明专利20多项,获得省部级科学技术奖励2项。



0 引言

可见光通信(VLC)技术在室内定位、通信以及水下通信等领域有着广泛的应用前景。其中,可见光复用与调制技术受到了国内外学者的广泛关注。例如:王旭东团队^[1]致力于通过混合调制技术提升频谱利用率;赵黎团队^[2]则研究了采用快速傅里叶变换(FFT)、提升小波变换(LWT)和正交频分复用(OFDM)技术的VLC系统;迟楠、郭心悦团队^[3-4]则专注于基于波分复

用(WDM)、多输入多输出(MIMO)等技术的 VLC 复用研究。此外,为了提高 VLC 系统的接收效率,国内外学者还积极探索了阵列接收、成像接收等新型接收方式。

但是,上述 VLC 技术研究大多聚焦于通信性能的提升,而对通信过程中的照明效果关注不足。本文旨在构建一个既能保证稳定照明又能实现高效通信的可见光色分复用通信系统。

1 系统硬件设计

本文提出的可见光色分复用通信系统硬件设计框图如图 1 所示。发送端由微控制器单元(MCU)、可见光发送电路、显示屏、按键、电源、发光二极管(LED)和安全数字(SD)卡组成。接收端则由滤光镜、可见光接收电路、MCU、显示屏、按键、电源和 SD 卡构成。

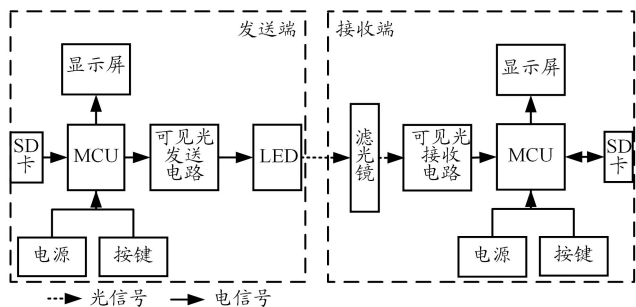


图 1 总体硬件方案框图

1.1 可见光发送电路

1.1.1 LED 光源

在发送端,红色、绿色和蓝色 3 个单色 LED(下文简称三单色 LED)分别通过 3 路可调电源进行驱动^[9]。

三单色 LED 具有各自特定的波长,分别为 450、500、600 nm,其频带宽度分别为 40、45、40 nm。这 3 种颜色的光信号在通过接收端的窄带滤镜后,仍能保持较高的光强,且波峰之间相对独立。然而,由于 3 个 LED 相互独立,通信过程中需要严格控制它们的角度和光强的一致性,这增加了控制的复杂度。本文选择这种三单色 LED 作为光源,LED 功率为 3 W。另外,使用发散角度为 10°的凸透镜聚光,以提高远距离的光信号强度。

1.1.2 调制方式

脉冲相位调制(PPM)是一种数字调制技术,它通过记录从上升沿到下降沿的高电平持续时间来判断传输的信号,无需额外设置时序信号线。PPM 通过利用下降沿作为时间节点,并增加高电平的总体时长,有效改进了可见光信号的传输,从而最小化了可见光亮度的降低,满足了照明与通信的双重需求。相较于

OFDM,PPM 虽然理论上的传输速率较低,但对处理器的计算能力要求不高,且不需要高速数/模转换器(DAC)。本文采用了 PPM 方式进行信号调制,调制过程由 MCU 编程实现。

1.2 可见光接收电路

可见光接收电路主要由 OPT101 单片光电二极管芯片和单电源跨阻放大器构成。该芯片是一款由德州仪器推出的集成光电二极管与运算放大器于一体的 8 引脚双列直插式芯片。芯片内部含有一个处于反向偏置状态的电压-电流转换电路(输入电流即为光电二极管产生的光电流)和放大反馈回路,该回路由 1 MΩ 电阻和一组旁路电容组成,可通过芯片的其它引脚灵活地进行电阻和电容的串联或并联操作,进而调节电路的增益和频率响应特性。

OPT101 单片光电二极管芯片在可见光频段(400~700 nm)内对不同波长的光具有不同的响应特性,即接收到的光波长越长,激发的电压越高。因此,为了保证 3 路光信号接收到的电压尽可能一致,本文尽量避免使用波长过长或过短的 LED 光源。

1.3 滤光镜

接收端选用的滤光镜与发送端 LED 的中心波长相匹配,滤光镜的中心波长分别为 450 nm(对应蓝色光)、500 nm(对应绿色光)和 600 nm(对应红色光)。这些滤光镜的通带宽度均为 10 nm,中心透过率分别为 45%、50%、50%。

1.4 光收发控制电路

光收发控制电路分为光信号发送控制电路和光信号接收控制电路两部分,其核心控制器为 STM32F407 型 MCU。该控制器的主要构成部分包括 MCU 最小系统电路、按键以及显示屏等组件。这样的设计确保了控制电路既稳定又具备所需的功能。

光信号发送控制电路由 3 个结构相同的子电路组成,每个子电路都独立控制一个 LED 光源。为了实现稳定的光强输出,每个 LED 的发射电路都配备了独立的 LM2596 可调稳压管和相应的滤波电容。这种精心设计的稳压电路确保了 3 路 LED 的输出光强基本一致。此外,LED 信号的调制是通过金属-氧化物-半导体(MOS)管控制来实现的,这保证了信号传输的准确性和稳定性。

在光信号接收控制电路的设计中,本文采用了二级处理的方式。第一级采用的是 OPT101 单片光电二极管芯片和运算放大器,用于高效地将接收到的光信号转换为电信号并进行放大。第二级是基于 LM393 的

电压比较器电路,它将第一级输出的电压与预设的阈值电压进行比较,并据此输出高低电平信号。考虑到环境光、距离以及接收角度的变化可能会导致第一级输出端的电压波动,本文特别使用了 DAC 来输出动态阈值给比较器,从而确保在不同的条件下都能获得准确可靠的接收信号。

2 系统软件设计

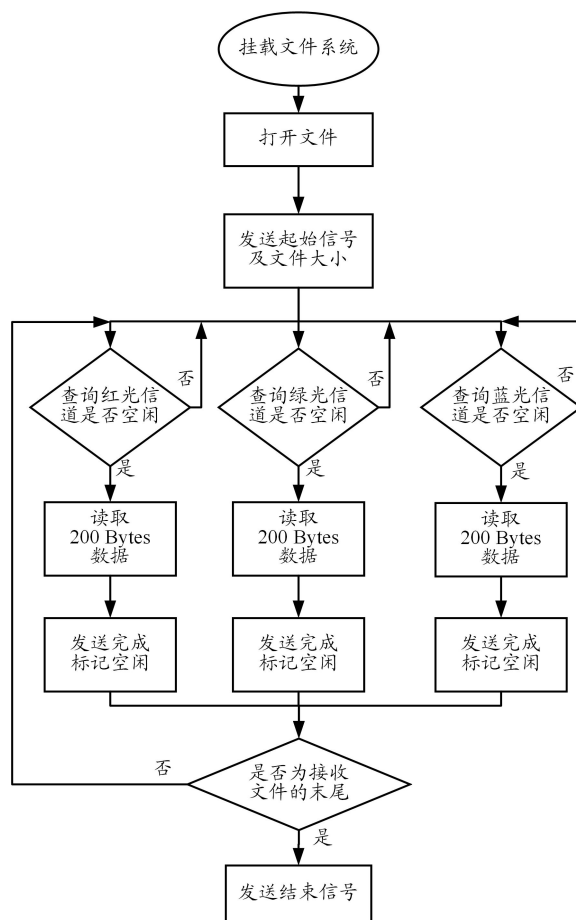
系统软件被划分为发送端软件和接收端软件两部分。发送端软件主要负责处理待发送的数据,并利用 PPM 技术对这些数据进行编码处理。编码后的信号会被智能地分发到 3 路光发射器进行发送。此外,发送端软件还具备信道占用查询功能,确保数据仅在信道空闲时发送,并在发送完成后及时释放信道资源。

接收端软件负责将从光信号接收器输出的电信号进行解码,并根据编码时的序列号将不同光信道接收到的数据进行精准拼接,最终合成完整的文件进行存储。在解码过程中,接收端软件还利用定时器进行精确计数,根据光信号的上升沿和下降沿来判定接收到的比特值是 1 还是 0,从而确保数据的准确性。

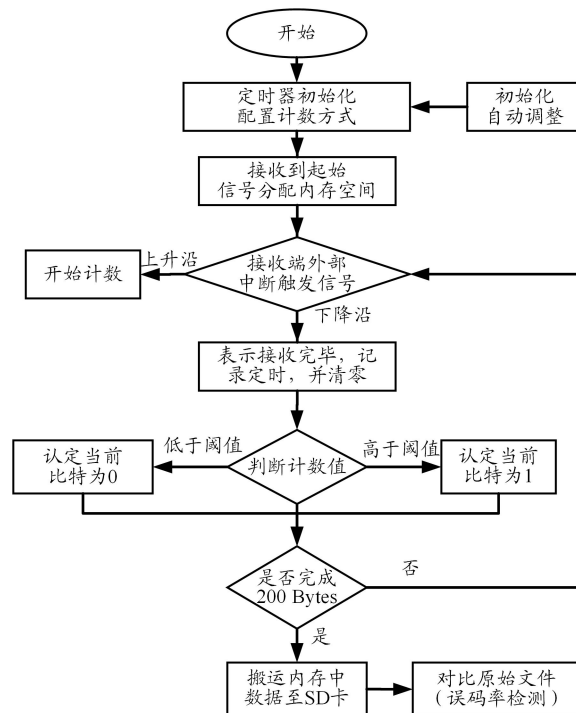
为了便于测试,本设计选用了 SD 卡作为收发数据的存储介质。收发控制流程如图 2 所示。在发送数据时,系统首先进行初始化,并从文件中读取内容至各信道的读取缓冲区。若信道未被占用,则系统继续从文件中读取 200 Bytes 的信息,并分发至相应的 LED 进行发送。发送过程中,系统会实时更新信道状态,确保发送的连续性和准确性。在发送文件前,系统还会通过数据帧编号中的控制字传输文件大小信息,并在传输结束时发送结束信号,通知接收端停止接收。在接收数据时,接收端软件通过光信号接收程序实时读取信号。一旦接收到起始信号(其中包含文件大小信息),接收端即开始准备接收文件。接收过程中,接收端会在外部静态随机存取存储器(SRAM)中申请与文件大小相匹配的内存空间,并将接收到的数据包按照大小存入对应的缓冲区。同时,通过定时器的精确计数功能,对接收到的光信号进行解析,判定每个比特的值。当接收到完整的 200 Bytes 数据后,接收端会将其转存至 SD 卡,并进行误码率检测,确保数据的完整性和准确性。

2.1 误码率检测

发送端传输一份两边都拥有的文件,接收端在接收完成后把接收到的文件和原始文件进行逐一字节对比,一旦有字节错误,就把错误字节数加一。统计完



(a) 发送控制流程



(b) 接收控制流程

图 2 收发控制流程图

成之后,接收端用错误字节数除以整个文件的字节数,得到该系统的传输误码率,完成误码率检测。

2.2 初始化自动调整

由于接收端接收到的光信号强度与传输距离和入射角有关,因此传输距离越短,模/数转换器(ADC)读取到的对应电压峰值就越高。此外,在高环境光强的条件下进行通信时,接收端还会受到环境光的影响,这种影响在短时间内难以消除,从而导致接收端存在较低的基础电压。为了提高系统的稳定性,并更好地适应不同的环境条件,系统初始化操作如下:

1)发送端让3个LED端口分别发送不同的固定数据帧。

2)接收端采集当前各路转换得到的最高电压值和最低电压值,并通过直接内存访问(DMA)方式直接存储到缓存数组中。从这些数据中提取最大值和最小值作为该信道的峰值电压和基础电压。再对这2个值进行加权平均,得到当前状态下的阈值,并将这个阈值写入电可擦除只读存储器(EEPROM)。随后,根据当前的参考电压值进行数/模转换。当接收端在当前阈值条件下,各路能够连续10次同时接收到正确的数据帧时,即认为阈值调节成功,此时停止向EEPROM写入新值。最后一次写入的电压值会被保存下来,并作为阈值电压输入给电压比较器。

2.3 可见光 PPM

本设计采用了低电平 PPM,具体实现方法如下:根据前一个低电平的上升沿与后一个低电平的下降沿之间的时间间隔来进行数字信号的传输。根据不同的传输速率,以低电平脉冲持续的时间作为1个单位宽度。如果2个低电平脉冲之间的间隔为1个单位宽度,则认为该比特位为0;如果2个低电平脉冲之间的间隔为4个单位宽度,则认为该比特位为1。系统每秒能够发送的基础单位数量定义为该系统的传输速率。PPM作为一个独立的功能模块,在每次发送信号时被调用以完成调制,并驱动可见光发送电路来完成可见光信号的发送。

2.4 数据帧格式与数据报文发送

一个完整的数据帧包括以下几个部分:

1)起始信号。由一个低电平脉冲后跟着10个单位的间隔组成,标志着一个帧的开始。

2)验证码。十六进制表示为0x55,即连续4次的“0101”循环。由于LED发出的光信号可能会受到距离、接收角度、环境光等因素的影响,导致信号接收的准确性降低,因此加入了这4组“0”和“1”的组合。如

果这4组信号都被正确接收,就认定发送和接收过程正常,并继续进入数据帧的下一个部分。

3)序列码。由8 bits组成,用于标识帧的顺序。在接收端需要对帧发送的字节进行拼接,因此序列号是不可或缺的。该设计将序列号的范围限制在0~200,未使用的其它序列号则作为控制字,用来传输一些控制信息。

4)数据码。由8 bits组成,是接收端需要拼接的目标数据。

5)结束信号。由2个单位的低电平和1个单位的高电平组成的序列发送4次,标志着该帧的结束。

数据帧序列的格式及波形如图3所示。

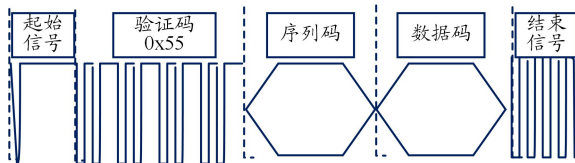


图3 数据帧序列格式及波形

数据报文是指通过一个信道单次发送的、由多个数据帧组成的最小单位。当系统检测到信道处于空闲状态时,程序会向该空闲信道分配下一个数据报文。接收端收到报文后,需要对其进行解码,并根据帧的序列号拼合数据。随后,这些拼合的数据会被存储到SRAM芯片中的缓存区。待整个报文接收完成后,接收端对接收到的数据进行进一步的拼合处理。当接收到结束信号时,接收端再将拼合完成的文件存入SD卡,并释放SRAM缓冲区中的内存。

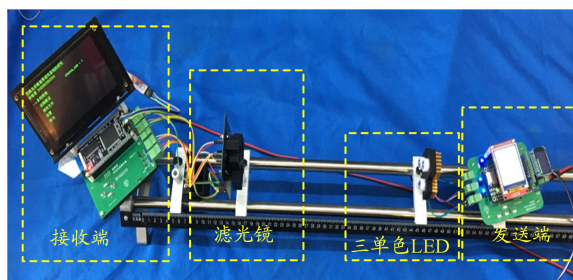
3 色分复用实验测试

3.1 实验测试装置

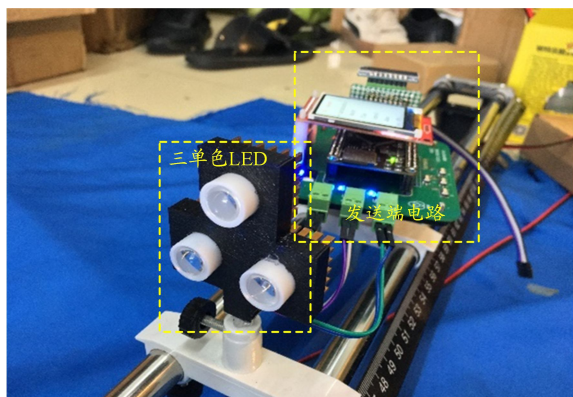
实验装置使用了一条长度为80 cm的光学实验导轨。导轨上装有可移动的支架,发送端与接收端都被安装在这些支架上,便于调节它们之间的传播距离。装置的实际布置如图4所示。

发送端的三单色LED发光模块采用了正三角形布局固定在支架上。每个模块都配备了特定波长的LED、铝基散热片、10°聚光镜以及电源引线(用于连接发射控制器)。根据实际需要,可以轻松更换不同波长的LED作为光源。每个模块都能独立工作,且可以灵活替换LED灯以适应接收端滤光镜的不同需求。三单色LED发光模块后端连接发射控制器,用于精确控制发光模块的工作状态。

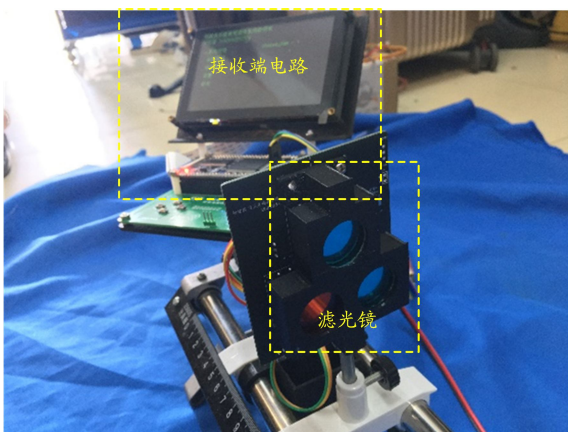
接收端前端配备了滤光镜组,该组由与发送端信



(a) 实验装置全景图



(b) 可见光发送端



(c) 可见光接收端

图4 装置实物图

道波长相匹配的3个窄带滤光镜组成。滤光镜与光电接收单元同样采用正三角形布局安装,通过更换滤光镜可实现不同信道光信号的接收。接收端电路提供了3.3 V 电源接口、光信号接收接口、放大电压测量接口以及阈值电压输出接口,这些接口均与后端的接收控制器相连。此外,MCU 也与接收控制器及液晶显示屏相连,实现了整个装置的控制与显示功能。

3.2 实验测试

3.2.1 可见光3路色分复用的可行性测试

实验以10 kHz的信号载波频率进行光信号的发送与接收。本文测试了3个信道波形(经滤光处理后)和未滤光的信号波形,测试结果如图5所示。可以看

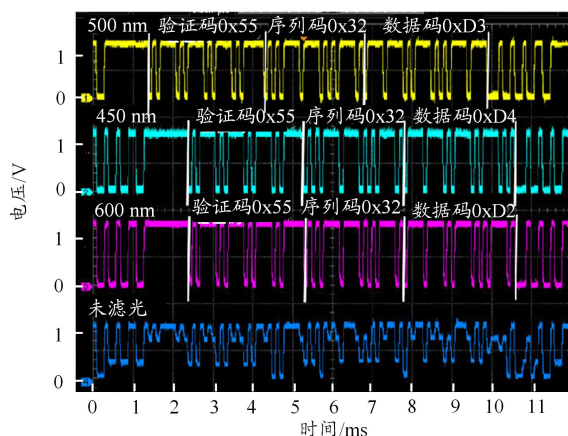


图5 3个信道波形(经滤光处理后)和未滤波的信号波形

出,与未滤波信号相比,经过滤光处理的3个接收信道波形能够从混合的光信号中还原出原始发送的光信号,并能够提取出各个信道的数据帧。

3.2.2 信道之间串扰测试

本文在长方体暗箱中对系统进行了信道间相互干扰的测试,测得的波形如图6所示。可以看出,尽管3个信道之间存在轻微的干扰,但通过波形整形可以有效消除这种串扰的影响。

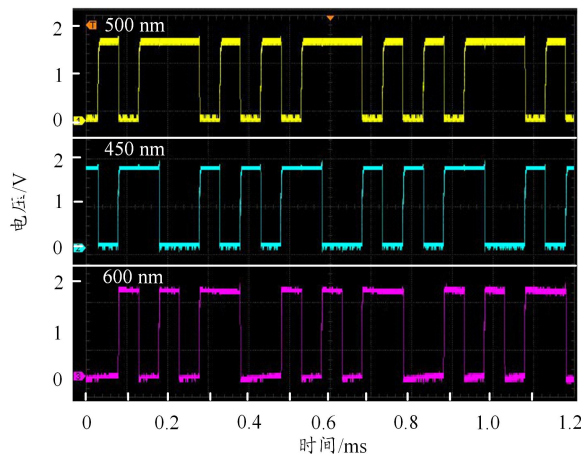


图6 3个信道经比较整形后的测试波形

3.3 眼图测试

本文使用示波器采集了各通道接收放大电路与整形电路之间的波形,以形成信号的眼图,并据此观察信号的传播性能。测试环境为实验室,照明条件为50 Hz的荧光灯光源,排除了日光的影响。测试过程中,发送端和接收端之间保持了30 cm的距离。测试结果如图7所示,每个分图从上至下的3个波形分别代表红光通道、绿光通道和蓝光通道。可以看出,随着发送速率的增加,眼图逐渐闭合,即眼图的开口变小,同时信号的上升沿和下降沿变得更为平缓(斜率减

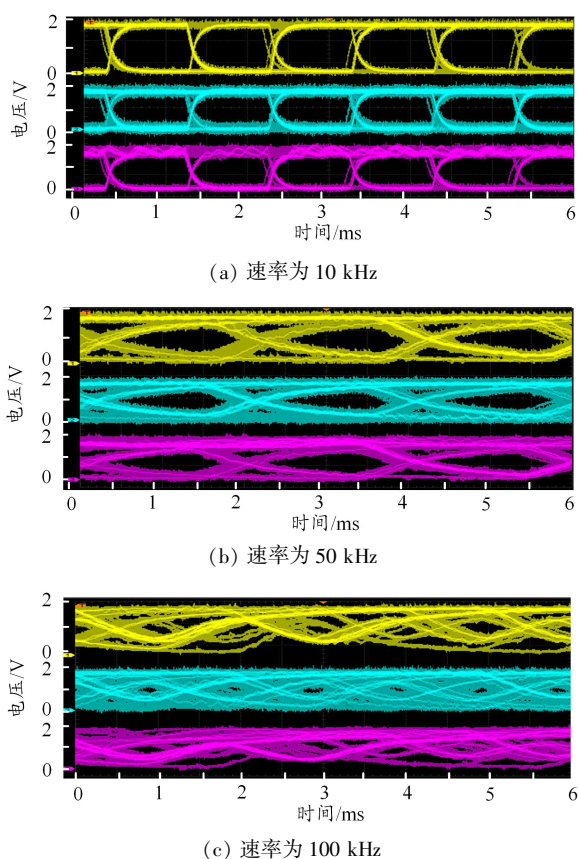


图7 测试眼图

小),这表明信号的采集变得更加困难,产生的误码也随之增多。误码率随速率变化的关系图如图8所示。可以看出,当发送速率在50 kHz以下时,可见光3路色分复用系统的误码率较低,约为0~2.5%;当发送速率超过50 kHz时,误码率随速率的增加而迅速上升;特别是当发送速率超过90 kHz后,由于误码率过高,可见光色分复用系统无法完成初始化。

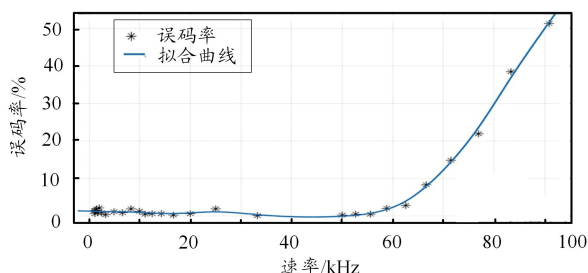


图8 系统接收误码率和速率关系图

3.4 图片传输测试

本文采用一张尺寸为240×135的JPEG图片进行传输测试。在测试过程中,首先将图片显示在屏幕上,然后将其保存在SD卡中。测试结果如图9所示。可以看出,当发送速率低于25 kHz时,误码率维持在1%左右,此时图片能够基本保持原貌;然而,当发送速率提升

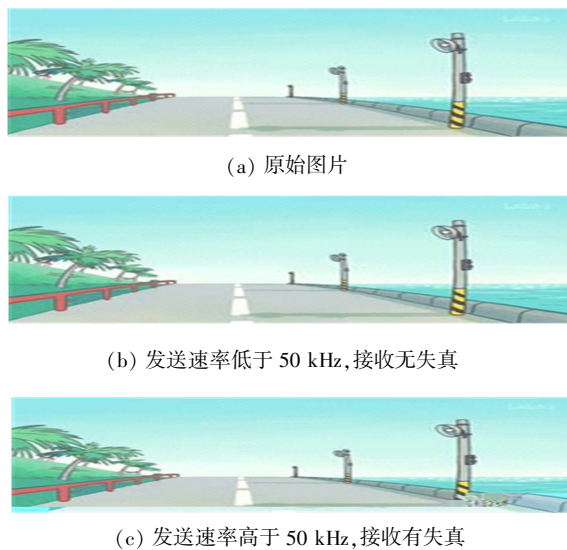


图9 图片传输测试

至50 kHz及以上时,JPEG图片开始出现明显的错误色块和偏移失真。

4 结束语

本文提出了一种可见光色分复用通信系统,并对其进行了实验测试。测试结果表明:在发送速率低于50 kHz时,波形数据正常且清晰,眼图效果良好,可以实现稳定的通信;而当发送速率提升至50 kHz以上时,JPEG图片会出现明显的错误色块和偏移失真。这一方案为可见光色分复用通信系统的构建提供了宝贵的技术参考。

参考文献:

- [1] 任嘉欣,王旭东,吴楠,等.一种频谱高效的可见光混合调制方案[J].光通信技术,2023,47(1):51-57.
- [2] 邱涵,张峰,赵黎.基于NOMA-VLC系统的GWO-DNN信道估计方法[J].光通信技术,2024,48(2):62-67.
- [3] 迟楠,王哲.可见光通信复用技术研究进展[J].光通信技术,2020,44(4):1-7.
- [4] 沈媛,郭心悦.混合NOMA/OFDMA可见光通信系统资源分配[J].光通信技术,2024,48(2):24-29.
- [5] 邱杰凡,李成林,陈立建,毛科技.面向物联网的可见光近场通信方法研究[J].传感技术学报,2019,32(6):872-880.
- [6] 赵云杰,邵宇丰,龙颖,等.瑞利衰落信道下QAM-OFDM可见光信号传输特性的研究[J].光电子·激光,2019,30(8):804-809.
- [7] 王昊,赵黎,张峰,等.基于OGSM-MIMO的可见光通信与定位系统设计[J].激光杂志,2023,44(2):123-128.
- [8] 邓健志,程小辉.可见光车灯信号发送控制装置[J].光学精密工程,2020,28(12):2710-2718.
- [9] 邓健志,孙科壮,程小辉.LED路灯可见光通信模型的研究[J].光通信技术,2020,44(5):53-57.