

基于 RGB 型 LED 的光学相机通信系统的实现方案

张 龙,王旭东,吴 楠*

(大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026)

摘要:针对可见光-光学相机通信技术的实现,提出了一种传输速率及信息容量高效的可见光通信系统解决方案。该方案采用 RGB 型 LED 作为信源发射机,通过波分复用的方式可有效提高系统传输速率及信息容量,接收端以 Android 智能手机搭载光学相机作为接收机,利用手机相机的卷帘快门工作特性实现信息的接收。对于信息接收解码,设计了基于 Java 语言可独立运行的 Android APP,通过引入直方图均衡化、最小二乘拟合等技术有效地抑制了接收图像的光晕效应,并且提出的同步动态补偿技术有效地提高了信息传输的可靠性。实验表明:提出的方案可在 Android 智能手机上实现传输速率为 21.6kb/s 的信息传输。

关键词:光学相机通信;可见光通信;直方图均衡化;卷帘快门

中图分类号:TN929.12 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)05-0026-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Realization scheme of optical camera communication system based on RGB-LED

ZHANG Long, WANG Xudong, WU Nan*

(Information Science Technology College, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: In view of the realization of visible light-optical camera communication technology, this paper proposes a scheme of visible light communication system to increase transmission rate and transmission capacity. In this scheme, RGB-LED is used as the source transmitter, which can effectively increase the system transmission rate and transmission capacity via wavelength division multiplexing. The receiving end is equipped with an optical camera as an receiver on an Android smartphone, and uses the rolling shutter mechanism of the mobile-phone camera to receive information. In view of the process of the information receiving and decoding, this paper designs an Android APP which can run independently based on Java language. By introducing histogram equalization, least squares fitting and other techniques, the blooming effect of the received image is effectively overcome, and the proposed synchronous dynamic compensation technique effectively improves the reliability of information transmission. The experimental show that the proposed scheme can realize the transmission of information with a transmission rate of 21.6kb/s on the Android smartphone.

Key words: optical camera communication; visible light communication; histogram equalization; rolling shutter

0 引言

随着用户需求的日益增长,传统无线通信技术的频谱资源呈现紧张态势。可见光通信(VLC)技术由于

不需要占用射频频谱资源即可完成通信的优势得到越来越广泛的关注。作为 VLC 技术的分支,光学相机通信(OCC)技术继承了 VLC 技术的优点^[1],可以利用现有的照明系统作为发送端工作,但与采用光电二极管作为接收端的传统 VLC 技术不同,其采用智能设备中的内置摄像头作为 OCC 系统的接收端,利用互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器的卷帘快门工作方式可将传送信息记录下来,最后经过解码恢复所传送的信息,因而在成本和操作便利性方面更具优势。

传统 VLC 系统,发送端通常使用白光 LED。近年来,一些学者探究了基于 RGB 型 LED 的 VLC 系统,

收稿日期:2018-12-17。

基金项目:国家自然科学基金(61371091)资助。

作者简介:张龙(1996-),男,山西阳泉人,2017 年获得大连海事大学电子信息工程工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为可见光通信技术。2017 年获得校级一等学业奖学金一项,2018 年获得“优秀研究生”荣誉称号。

*通信作者:吴楠(E-mail: alfred.nan.wu@gmail.com)。



通过仿真分析和实验验证了波分复用技术在 VLC 领域的可行性^[2,3]。由于波分复用的引入可有效增加 OCC 系统的传输容量以及通信速率^[4],基于 OCC 系统原理,本文提出一种采用 RGB 型 LED 作为信源发射机的 OCC 系统设计方案。设计的 OCC 系统以 Android 智能手机搭载光学相机作为接收端,利用手机相机的卷帘快门工作特性实现信息的接收。

1 OCC 系统原理

1.1 卷帘快门原理

通常根据制造工艺和应用方法将相机的图像传感器分为 2 种,即电荷耦合器件(CCD)图像传感器和 CMOS 图像传感器。CMOS 图像传感器可以通过电路设置来消除噪声和放大信号,因此具有能量效率高且噪声小的优势,进而被广泛嵌入智能设备中^[6]。

2 种图像传感器存在 2 种曝光效果,即全局快门和卷帘快门。全局快门是通过整幅图片在同一时间曝光实现的。传感器所有像素点同时收集光线,同时曝光,即在曝光开始时,传感器开始收集光线;在曝光结束时,光线收集电路被切断,然后传感器值被读出即为一幅照片。与全局快门不同,卷帘快门是通过图像传感器逐行曝光的方式实现的。曝光开始时,传感器逐行扫描进行曝光,直至所有像素点都被曝光^[7,8]。因此,卷帘快门的曝光方法可以记录更多信息,适用于 OCC 系统。

卷帘快门原理如图 1 所示。当 LED 亮时,将在图像上产生亮条纹;当 LED 灭时,将在图像上形成暗条纹。亮条纹表示二进制信息“1”,暗条纹表示二进制信息“0”。因此,通过控制 LED 闪烁可以实现 OCC 系统中的数据传输。当使用单色 LED 作为 OCC 系统发送端时,图像中的一行条纹表示 1bit 信息;而当使用 RGB 型 LED 作为发送端时,图像中的一行条纹则将包含 3bit 信息。

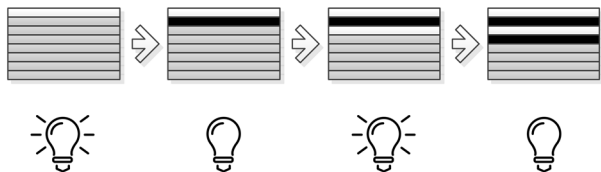


图 1 OCC 信息的卷帘快门成像原理

1.2 系统通信协议

本系统采用二进制开关键控(OOK)调制技术,如果 RGB 型 LED 灯的其中一个灯芯发送比特“1”,则其

所对应的整个码元周期发送光脉冲;如果发送比特“0”,则在对应的码元周期内不发送信号^[9]。一个码元周期内红、绿、蓝 3 个灯芯同时独立地发送信息。在此调制方式下,光源的强度直接被二进制信息序列所调制,实现简单,可以显著降低系统复杂度。

数据帧结构设计如图 2 所示。数据帧由 4 部分组成,分别为帧同步头、帧标签、字符信息和帧尾。帧同步头部分采用 5 位二进制符号“1”作为起始标志,帧标签即识别(ID)序号由 8 位二进制信息组成,表示此帧的字符信息是第几组。在发送端,输入的字符数据按 2 个字符为一组构成字符信息子帧并被分配一个 ID 序号,序号由 1 开始;在接收端,接收到的每帧字符信息根据其对应的 ID 序号被重新排列起来。字符信息包含 2 个字符数据,每个字符均由 8 位二进制符号表示,每个符号采用曼彻斯特编码,即由 16 位长的 0、1 比特序列表示一个字符。帧尾包含奇偶校验位和帧隔离位“0”,采用奇偶校验的原因是校验位会单独占用一个彩色条纹,而一个彩色条纹能够包含 3 位信息,为了减少信息位的浪费,同时增加每帧的检错能力,故选择奇偶双重校验。奇偶校验位中奇校验位和偶校验位各占 1 位,接收到的每帧数据将分别进行奇校验和偶校验,若与发送的奇偶校验数据不符,这帧数据将被舍弃。

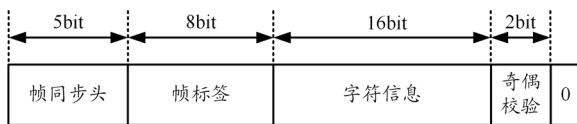


图 2 数据帧结构示意图

发送端以图 2 格式发送信息帧,发送的测试信息“Hello DLMUer!”在接收端手机拍照所得照片如图 3 所示。相机卷帘快门由上至下逐行成像,形成多个信息帧,其中,最宽的条纹对应全高电平的帧同步头,随

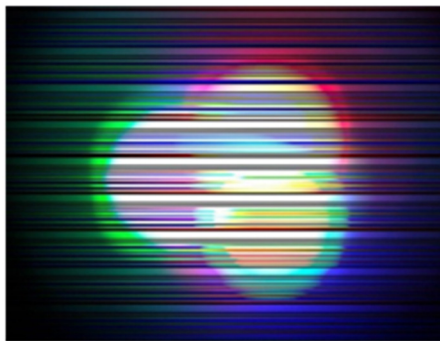


图 3 接收端手机拍摄照片示例

张龙,王旭东,吴楠:基于 RGB 型 LED 的光学相机通信系统的实现方案

后的彩色条纹携带着帧标签、字符信息和奇偶校验数据信息。帧尾的“0”对应着彩色条纹后的黑色条纹,这一特点有利于判断照片成像时的扫描方向,避免反向读取导致数据出错,同时也起到帧与帧之间的隔离作用,有利于同步头的检测和提取。

在发送 ID 序号以及字符信息时,将 8 位二进制信息分为 3 部分:低三位、中间三位和高两位,每部分中从低位到高位分别由蓝色、红色和绿色来传递信息,具体如表 1 所示。接收端针对这种二进制信息传输配置方案制定了相应的信息提取措施,将在后续 2.3 节中进行详细描述。

表 1 RGB 型 LED 中二进制信息传输配置方案

颜色	二进制信息位置		
蓝色	第一位	第四位	第七位
红色	第二位	第五位	第八位
绿色	第三位	第六位	

2 OCC 系统设计与实现

2.1 系统整体设计

基于 RGB 型 LED 的 OCC 系统整体设计如图 4 所示。首先将待发送信息输入到计算机中,通过串口调制助手软件由通信串口写入到发送端单片机内,随后单片机对待发送信息进行编码调制,用调制后的信号控制 LED 驱动电路。本系统采用 RGB 型 LED,LED 的红、绿、蓝 3 个灯芯将在驱动电路的控制下闪灭,对外发送信息。

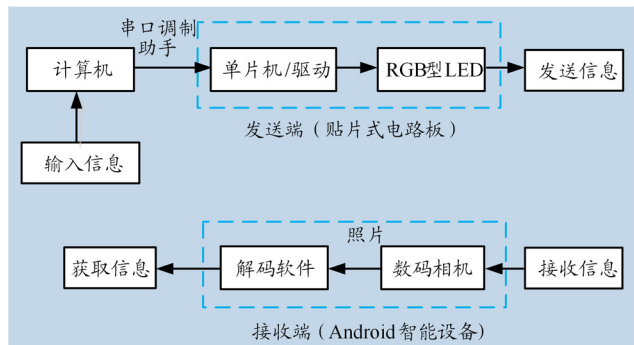


图 4 基于 RGB 型 LED 的 OCC 系统组成结构

接收端使用搭载光学相机的 Android 智能设备对发送端的 RGB 型 LED 进行拍照,由于内置相机的卷帘快门工作特性,逐行曝光扫描,每张照片将记录一段时间内 LED 灯的红、绿、蓝 3 个灯芯闪灭情况,形成

彩色条纹。获取照片后,通过相应软件对照片进行图像处理,解码获取信息。最终根据通信协议排序并拼接信息,将所获信息显示在软件界面上。

2.2 发送端设计

发送端硬件部分集成在贴片式电路板上,其结构示意图如图 5 所示。待发送信息由串口调制

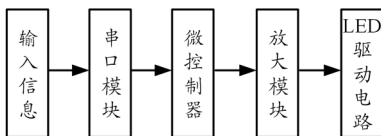


图 5 发送端结构图

助手写入,经过由 USB 至通用异步收发器(UART)的桥接控制芯片及其外围电路构成的串口模块将数据信息送给以 C8051F330 单片机为核心的微控制器^[10],随后微控制器对数据进行 OOK 调制,最后将调制编码完毕的信号通过数/模转换后输出到下一级。

系统中的放大模块内部集成 2 个独立的运算放大器(缓冲放大器和主放大器),分别用来实现阻抗匹配和模数隔离功能^[11]。

放大模块后接 LED 驱动模块。LED 属于电流型器件,本文采用典型的电流控制器件三极管来进行电流驱动,最终实现 RGB 型 LED 对外发送信息功能。

2.3 接收端设计

OCC 系统接收端硬件为搭载数码相机的 Android 智能设备,通过开发相应的应用程序来实现 VLC 接收功能。发送端开始正常循环发送信息后,使用 Android 智能设备对准发送端的 RGB 型 LED 灯光进行拍照。由于数码相机的卷帘快门工作特性,成像时逐行曝光,在一张照片的成像过程中将记录一段时间内 RGB 型 LED 灯的闪灭情况,形成规则的彩色条纹状图片。获取图片后,开始对图片进行处理,提取所接收到的光通信信息。接收端的主程序工作流程如图 6 所示。为使接收端正确提取信息,需要实现以下几项关键技术。

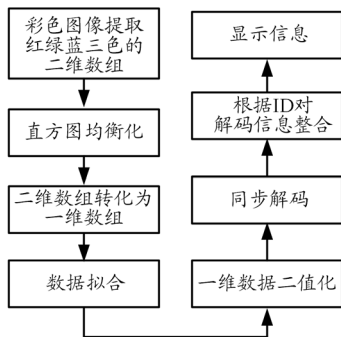


图 6 接收端主程序流程图

①图像信息生成。由于数码相机拍照后所得图像为彩色图像,图像中每个像素点都包含红、绿、蓝 3 色的数值信息,通过 Android 中的函数可以将整个图像转化为红、绿、蓝的 3 个二维数组。

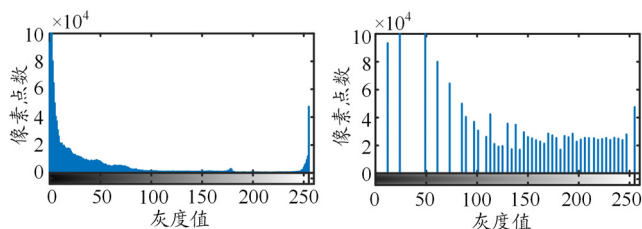
②灰度均衡实现。为了增加明暗条纹的对比度,

张龙,王旭东,吴楠:基于 RGB 型 LED 的光学相机通信系统的实现方案

提升后续解码的可靠性以及稳定性,引入图像处理技术中的直方图均衡化 (Histogram Equalization, HE) 方法。其核心思想是把原始图像的灰度直方图从比较集中的某个灰度区间变成在全部灰度范围内的均匀分布。采用 HE 前后的效果比较如图 7 所示,经过 HE 处理后,其直方图动态范围增大,将有助于提高后续解码可靠性。



(a) 原图 HE 处理前后(左前右后)



(b) 直方图 HE 处理前后(左前右后)

图 7 HE 处理前后效果比较

③光晕效应抑制。HE 处理之后,每个二维数组的元素值为 0~255 之间的某一整数,表示电平高低。理想情况下,低电平数值趋近于 0,高电平数值趋近于 255。由于图像存在光晕效应,即图像中央亮而四周暗。在将二维数组转化为一维数组的降维过程中,引入光晕效应抑制方法,即将每行像素的电平值先进行升序排序,取前 30% 的数据求平均值,用此平均值来代替这行像素的电平值。通过此方法,对光晕效应起到了一定程度的抑制,同时二维像素矩阵数据被转化为一维数据,数组内元素个数为照片像素矩阵的行数,运算量被大幅度地减少。

④动态判决门限获取。接收端在拍照时所处位置并非总能正对发送端 RGB 型 LED 灯,且实际环境中存在自然光线的干扰,因此会导致接收端所成图像的整体电平值不均匀。典型情况为图像首尾整体电平值偏低,中间部分电平值较高,所以在幅图像中不能用一个恒定的电平值来作为高低电平的判决门限。为了解决这个问题,本文采用数据拟合的方法来根据图像各部分平均电平值来制定动态的判决门限,运算上采用最小二乘法实现。

最小二乘法的核心思想是寻找合适的函数 $f(x)$,使其与测量值之间的误差平方和达到最小,即有:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=0}^K [y_i - f(x_i)]^2 \quad (1)$$

从几何层面分析,数据拟合就是寻找与给定的点 $(x_i, y_i) (i=0, 1, 2 \cdots K)$ 距离平方和最小的曲线, K 为采样点总数。数据信息二值化过程是将最小二乘法拟合得到的曲线作为检测电平值的动态判决门限,电平值若大于该点的判决门限,则判定该点表示二进制信息“1”,反之则表示“0”。至此,彩色条纹图像就被恢复为二进制数据信息。

⑤同步动态补偿。根据恢复的二进制信息流,寻找帧头进行同步并解码每一帧信息。由于曼彻斯特码的每一位 0、1 比特信息在照片中的宽度至少占 13 个像素,即彩色条纹中最窄的条纹宽度为 13 个像素,根据实际情况,5 位二进制同步头信息所占像素长度约为 68~70。采用滑动窗口方法提取同步头,利用式(2)可以求得滑动窗口的长度 l :

$$l = \lfloor N_s / N \rfloor \quad (2)$$

其中, N_s 为同步头像素长度, N 为同步头的二进制位数。当 N_s 为 68 或 69 时,无法被 5 整除, $l=13$; 当 $N_s=70$ 时, $l=14$ 。但是,如果利用上述方法所得的滑动窗口长度进行同步,将会造成同步丢失问题,如图 8 所示。图中数值信息为图像中某一帧的二进制数据信息,以 $N_s=69$ 为例,红框圈出的部分表示同步丢失的二进制信息,随着滑动窗口向后移动,同步丢失的二进制信息随之增多,在第 15 个滑动窗口之后,系统将无法正确识别信息,产生严重误码。

为了解决同步丢失问题,本文提出了一种同步动态补偿方案。该方案的思想是根据滑动窗口长度 l 由式(3)计算得到新的同步窗口长度 l_n , 每个 l_n 中包含一个曼彻斯特码组(“0-1”码组或“1-0”码组)信息,每提取完一个曼彻斯特码组,往后移动相应的 l_n 。图 8 中展示了同步动态补偿方案的效果,可以发现 l_n 能够正确同步曼彻斯特码组,说明利用此方案能有效解决同步丢失问题。

$$l_n = \begin{cases} 2l+1, l=13 \\ 2l-1, l=14 \end{cases} \quad (3)$$

在采用同步动态补偿方案的基础上,利用大数判决法,以寻找“1-0”跳变为目标,由式(4)进行判决,其中 Data 数组为同步得到的二进制信息数据, T 为大数判决阈值门限,若寻找到一个“1-0”跳变,则计数器加

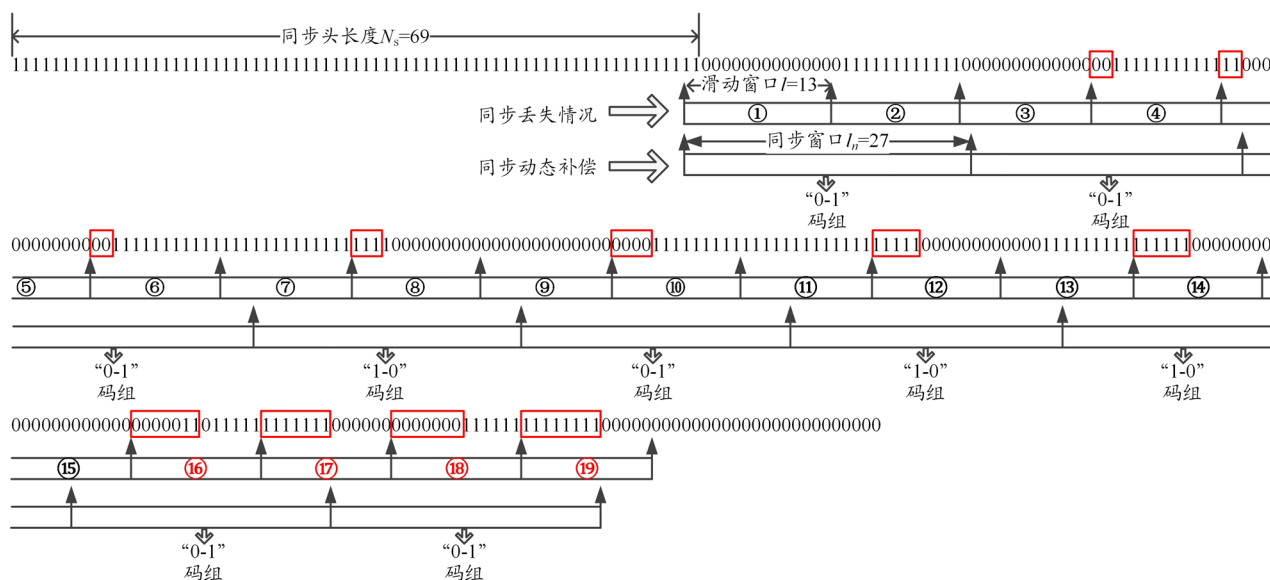


图 8 同步动态补偿方案示意图



图 9 OCC 系统测试环境

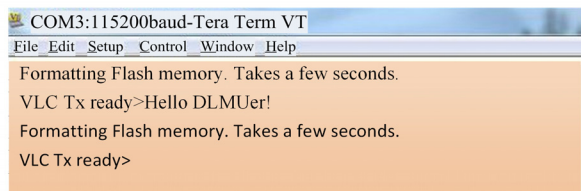


图 10 信息发送界面

1, 当计数器累加值大于阈值门限 T 时, 则认定该曼彻斯特码组传递的是二进制信息“1”, 否则认定是二进制信息“0”。

$$\sum_{i=0}^K \{ \text{Data}[i] - \text{Data}[i+l] > 0 \} > T \quad (4)$$

上述过程将每一帧中所包含的 ID 序号和信息字符解码成为二进制的 ASCII 码, 再根据每一帧的 ID 将数据排序整合, 并将 8 位二进制数所代表的 ASCII 码转化为字符形式, 最终在解码软件中将信息显示出来。

3 系统测试结果与分析

3.1 通信功能实测

将发送端通过 USB 接口与计算机相连, 开启串口调制助手, 发送测试信息“Hello DLMUer!”, OCC 系统实际测试如图 9 所示。本次实验通信串口为计算机 COM3 口, 波特率设定为 115200, 串口调制助手中的信息发送界面如图 10 所示。

接收端与发送端保持正常成像距离时, 采用即时拍照解码模式, 由于单张照片所能包含的数据信息有限, 因此发送信息不宜过长, 一般情况下要小于等于 16 位字符信息。利用 Java 语言开发独立运行的 Android APP, 运行后其信息接收界面如图 11 所示。测试结果表明, 接收端软件信息接收准确, 响应速率快, 能够实现 OCC 系统的通信需求。

3.2 误码率测试

本文分别在 21.6kb/s、17.28kb/s、14.4kb/s、10.8kb/s 和 7.2kb/s 等不同速率情况下进行了误码率实验, 每一种速率下发送样本约 2000 个字符, 经过传输实验, 获得的系统误码率结果如图 12 所示。

从图 12 可以看出, 随着通信速率的提升, 误码率



图 11 信息接收界面

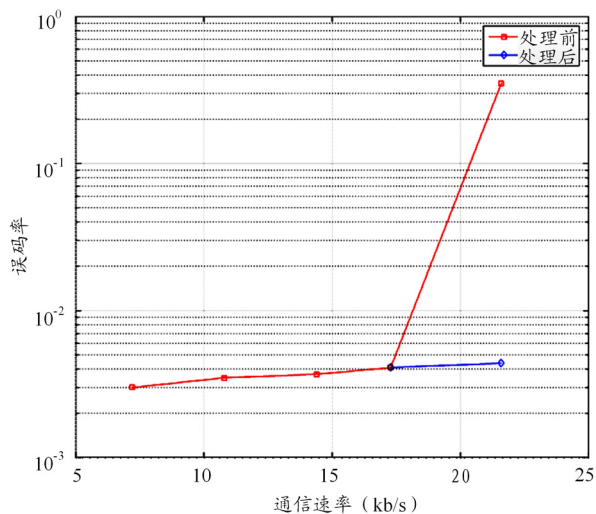


图 12 通信速率与误码率关系图

也随之有所增大。由于系统速率在 21.6kb/s 时出现严重的同步丢失情况,导致误码率高达 3.53×10^{-1} 。为了解决这个问题,本系统采用了 2.3 节中所述的同步动态补偿方案,使得系统在 21.6kb/s 传输速率时的误码率下降到了 4.4×10^{-3} 。为了保证一定的通信效率,同时让误码率控制在合理范围之内,本系统主要采用 21.6kb/s 的传输速率。此外,还可以看出,系统的误码性能在上述传输速率范围内比较稳定,说明本系统在适应不同类型信源方面具有较好的鲁棒性。

4 结束语

为了提高 OCC 系统中的通信容量和传输速率,本文提出了基于 RGB 型 LED 的 OCC 系统设计方案,对

系统发送端各个模块以及系统接收端信息接收解码过程进行了分析,通过制定有效的信息解码方案,实现了智能设备上传速率为 21.6kb/s 的光学相机通信功能,并通过系统测试验证了该 OCC 系统的可行性以及有效性。在未来的工作中,本系统还将在两方面做出改进:一是通过开发连续多帧图像解码算法来提高系统的传输效率;二是通过引入边缘检测算法(如 Sobel 滤波算子)来进一步提高系统的信息传输稳定性及可靠性。

参考文献:

- [1] LE N T, HOSSAIN M A, JANG Y M. A Survey of Design and Implementation for Optical Camera Communication[J]. Signal Processing Image Communication, 2017(53): 95-109.
- [2] 汪广业,高英明,王金鹏,等. RGB LED 可见光通信系统性能的仿真研究[J]. 光通信技术, 2015, 39(10): 41-43.
- [3] CHEN S H, CHOW C W. Color-filter-free WDM MIMO RGB-LED visible light communication system using mobile-phone camera [C]// International Conference on Optical Communications & Networks, November 9-10, 2014, Suzhou, China. Piscataway: IEEE, 2014.
- [4] 孙洪伟,王旭东,吴楠. 一种基于智能手机的可见光室内信标定位方法[J]. 光通信研究, 2017(1): 72-75.
- [5] RYU W J, SHIN S Y. RGB MIMO optical camera communication with Histogram equalization [C]// International Conference on Signals and Systems, May 16-18, 2017, Sanur, Indonesia. Piscataway: IEEE, 2017.
- [6] DO T H, YOO M. Analysis on visible light communication using rolling shutter CMOS sensor [C]// International Conference on Information and Communication Technology Convergence, October 28-30, 2015, Jeju, South Korea. Piscataway: IEEE, 2015.
- [7] GUAN W, WU Y, XIE C, et al. Performance analysis and enhancement for visible light communication using CMOS sensors[J]. Optics Communications, 2018(410): 531-545.
- [8] LEE H Y, LIN H M, WEI Y L, et al. Rolling Light: Enabling Line-of-Sight Light-to-Camera Communications[C]// International Conference on Mobile Systems, May 18-22, 2015, Florence, Italy. New York: ACM, 2015.
- [9] 陈泉润,崔钊,张涛,等. 基于 CMOS 传感器的光 ID 信息服务系统模型[J]. 半导体光电, 2016, 37(6): 853-857.
- [10] 旷亚和. 基于 LED 的无线数据传输技术研究与设计实现[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [11] 李卓龙,王旭东,张思雨,等. 基于广义空间调制的 VLC 调制方式研究[J]. 光通信技术, 2018, 42(6): 33-37.

欢迎投稿, 欢迎订阅!