

一种面向光学相机通信系统的数据帧结构

白 勃¹, 苏 博², 李静磊¹, 柯熙政³

(1. 西安电子科技大学通信工程学院, 陕西西安 710071; 2. 西安电子科技大学空间科学与技术学院, 陕西西安 710071;
3. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西西安 710048)

摘要: 针对光学相机通信(Optical Camera Communication, OCC)链路收发两端不同步和相机帧间间隔等因素引起 OCC 链路数据丢失的问题, 本文在分析相机接收机卷帘快门工作机制的基础上, 研究了光电二极管(Light Emitting Diode, LED)-相机 OCC 链路的基本工作原理, 以及相机像素行数、像素行读取时间、拍摄帧速率、拍摄角度姿态等因素对 OCC 链路数据传输速率、链路丢帧率等参数的影响, 并针对 OCC 链路的特点, 设计了一种新型的适用于 OCC 链路的数据帧结构. 通过对比分析发现, 使用该数据帧的 OCC 链路, 可以有效地解决收发端不同步和相机帧间间隔引起的 OCC 链路数据丢失的问题, 优于常用的交错 Hamming 码和 Raptor 码帧结构. 最后, 本文设计搭建了相关的 OCC 链路测试平台, 通过对比数字仿真结果和实际测量结果, 验证了理论分析的有效性.

关键词: 光学相机通信; 可见光通信; 数据帧结构; 卷帘快门; 数据传输速率; 丢帧率

中图分类号: N929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)10-1873-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200886

Data Frame Structure for Optical Camera Communication System

BAI Bo¹, SU Bo², LI Jing-lei¹, KE Xi-zheng³

(1. School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

3. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Aiming to fix the data loss problem of optical camera communication (OCC) data link resulted from the lack of sync between the camera and the LED signal lamp, as well as the gap time between every two consecutively captured pictures, the fundamental principle of LED-camera based OCC data link, camera parameters like pixel row number, pixel read out time, frame rate and shooting angle are analyzed in detail in this paper. Based on the characteristics of the OCC data link, a new data frame structure is proposed in this paper. When compared to the related data frame structure like interleaved Hamming coding and Raptor coding, the proposed data frame structure has a higher data transmission rate, and has the capability to fix both the inter-frame and intra-frame data loss problems. Numerical and measurement results both prove the validity of the theoretical analysis, finally.

Key words: optical camera communication; visible light communication; data frame structure; rolling shutter; data transmission rate; frame loss rate

1 引言

相机通信(Optical Camera Communication, OCC)技术作为可见光通信技术(Visible Light Communication, VLC)技术的一个分支,使用光学相机作为可见光信号接收机,具有抗干扰能力强、接收信噪比高、通信带宽大等优势,已经成为 VLC 技术领域的一个热点研究方

向^[1-3]. 同时, OCC 技术也已经成为 IEEE 协会最新发布的 VLC 技术标准的重要组成部分^[4], 并引起了来自国内外科研院所和公司企业等的关注. OCC 技术使用的光学相机主要包括高速工业相机^[5]、专用摄像/通信相机^[6]和普通相机 3 种. 其中, 高速工业相机和专用摄像/通信相机由于成本高昂、尚未普及等原因, 不易推广使用. 而普通相机已经广泛地集成在智能手机等日用电

收稿日期: 2020-08-15; 修回日期: 2020-11-20; 责任编辑: 王天慧

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61801356); 陕西省重点研发计划课题(No. 2020ZDLGY05-02); 2020 年度中央高校基本科研业务费创新创业专项(No. 14)

子产品中,无需额外的硬件,极易推广使用. 基于普通相机的 OCC 技术根据信号光源可以分为基于屏幕-相机的 OCC 技术和基于 LED-相机的 OCC 技术^[5]. 相比基于屏幕-相机的 OCC 技术,基于 LED-相机的 OCC 技术对信号光源没有特殊限制,而且无需复杂的图像编解码、图像矫正过程,具有复杂性低、计算量小、实时性高等优势,因此本文将研究着重基于 LED-相机的 OCC 技术.

由于 LED 信号光源发光强度、信号传输距离等因素的影响,相机接收机拍摄到的图片容易出现曝光不足或过曝等现象,可以通过调整相机感光度等相关参数或图像后处理等方式解决. 然而,相机连续拍摄的照片之间存在一个帧间间隔,会造成接收端数据信息的丢失和不完整,并降低 OCC 链路的数据传输速率. 除此之外,由于 LED 信号光源与相机接收机之间为单向数据传输链路,缺少反馈握手信号,极易出现收发端不同步的现象,也会导致接收端数据信息的丢失和不完整. 为了解决以上的 OCC 链路问题,来自国内外的学者们已经开展了很多工作. 为获得连续的数据信息,Chen 等人^[7]提出了一种将每一个数据包重复传输三次的时间分集技术,但大大降低了 OCC 链路的通信容量. Nguyen 等人^[8]提出了一种交错 Hamming 码用于补偿帧间间隔内丢失的数据信息,但当交错 Hamming 码帧头部分丢失或不能被有效恢复时,该方法不能正确还原接收到的可见光信号,导致 OCC 链路失效. 忽略背景光噪声和器件噪声时,OCC 链路可以等效为一个典型的删除链路. Yang 等人^[9]和 Yang 等人^[10,11]基于传统射频链路的删除信道编码理论分别设计了用于 OCC 链路的 LT 码和 Raptor 码,然而由于缺少对应的上行反馈链路,对应不同品牌或参数设置的相机接收机,LT 码和 Raptor 码需针对性地设置相关编码参数才能保证数据信息的有效传输. 同时,当 OCC 链路质量下降或被临时遮挡阻断时,相机接收机不能接收到足够数量的数据包用于数据恢复,从而导致 OCC 链路失效. 为了解决 OCC 链路收发端缺少同步信号的问题,Chow 等人^[3]设计了一种含 4 个重复数据比特的数据帧结构用于提取入射光信号的时钟频率,但忽略了帧间间隔引起的数据丢失问题. Le 等人^[12]设计了一种新型的 OCC 链路超帧结构,但仅能适用于较低速率通信场景. Guan 等人^[13]分析了使用不同形状 LED 信号光源和不同数据帧结构的 OCC 链路性能.

本文针对 OCC 链路收发端不同步、帧间间隔导致数据丢失等问题,设计了一种新型的 OCC 链路数据帧结构. 该帧结构可以有效地解决帧间间隔引起的 OCC 链路数据丢失问题,实现链路收发端同步,并提高 OCC 链路的数据传输速率.

2 基本原理

2.1 OCC 链路模型

LED-相机 OCC 链路模型如图 1 所示. 在发射端,为消除可见光信号亮暗闪烁对基本照明功能的影响,原始信息首先使用 4B6B^[12]等游程长度受限码(Run Length Limited, RLL)进行编码. 编码后的数据经过组帧调制之后,通过偏置器与直流供电信号混合,一起驱动点亮 LED 信号光源. 在接收端,一个集成在手机上的相机被用作接收机,通过连续拍摄接收来自 LED 信号光源的可见光信号. 使用边缘提取等图像处理过程将图片上的亮暗条纹还原为对应的数字信息. 再根据数据帧结构,使用解调后的数字信息估计 OCC 链路的收发端时间偏移、链路质量等参数. 最后经过解码还原出原始的数据信息.

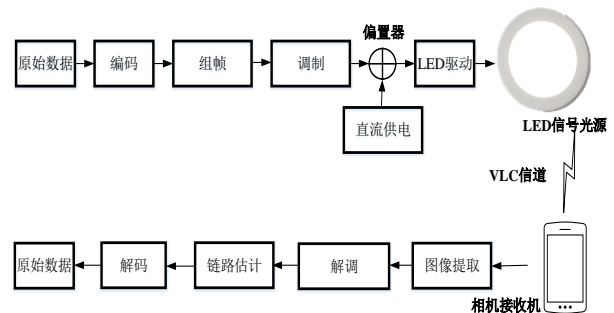


图1 LED-相机 OCC 链路模型

2.2 卷帘快门工作原理

CMOS 相机卷帘快门工作原理如图 2 所示. 图像传感器上的所有像素点并非在同一时刻曝光,而是按照从上到下的顺序进行逐行曝光并采样输出. 合理设置相机曝光时间后,使用光照强度表示数据的可见光信号会在拍摄到的图片中出现亮暗交替的条纹. 图像传感器的曝光时段 T_{open} 和帧间间隔 T_{gap} 可以表示为

$$T_{\text{open}} = T_{\text{exp}} + (N_{\text{ROW}} - 1) \times T_{\text{read}} \quad (1)$$

$$T_{\text{gap}} = 1/R_{\text{frame}} - T_{\text{open}} \quad (2)$$

其中, T_{exp} 和 T_{read} 分别表示图像传感器像素行的曝光时间和读取时间, N_{ROW} 表示图像传感器的像素行数, R_{frame} 表示相机拍摄帧速率.

不同亮暗的条纹表示不同的数字信息, OCC 链路的数据传输速率就可以表示为每一幅图片中的数据比特数与拍摄帧速率的乘积. 相机连续拍摄的照片之间存在一个帧间间隔,用于将不同像素行的数据合成一幅图片,以及像素行复位等操作. 在这个帧间间隔内,相机的图像传感器不感应接收任何入射的可见光信号,这会造成接收端数据信息的丢失和不完整,并降低 OCC 链路的数据传输速率.

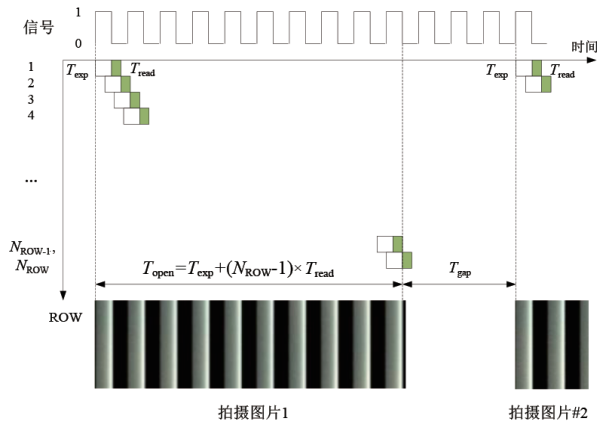


图2 卷帘快门工作原理

2.3 OCC 链路帧结构

为有效解决 OCC 链路收发端不同步和相机帧间间隔等因素引起数据丢失的问题,本文提出了如图3所示的面向 OCC 链路的数据帧结构. 每一个数据帧包含数据段和冗余段两个部分. 其中,数据段由帧头、标识位和数据载荷 3 个部分组成. 根据 4B6B 编码表,数据段 110100 和 001011 被选作帧头信息,交替地填入数据段的帧头部分,用于判断数据段的起始位置. 标识位的长度为 1 个比特,用于标识数据载荷部分的完整性. 具体地,数字比特“1”表示数据载荷部分完整,而数字比特“0”表示数据载荷部分有缺失. 数据帧的冗余段是为恢复相机接收机连续拍摄过程中帧间间隔引起的数据丢失而设置的. 冗余段由数据部分和残余部分组成,冗余段的数据信息直接从数据段周期复制,仅将残余部分的标识位由数字比特“1”改为“0”.

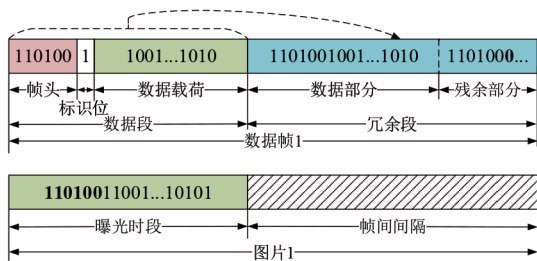


图3 面向 OCC 链路的数据帧结构

在接收端,从图片中检测获取的数据段帧头部分和真实发送数据段帧头部分间的时间偏移 n_{offset} 可以表示为

$$n_{\text{offset}} = \arg \left\{ \left| \sim \text{xor}(\text{header}, \tilde{r}[n]) \right| = N_{\text{header}} \right\} \quad (3)$$

其中,header 和 N_{header} 分别表示数据段帧头部分填充的数据及其长度. $r[n]$ 表示图像传感器在曝光时段 T_{open} 内接收到的数据序列, $\tilde{r}[n]$ 表示将数据序列 $r[n]$ 的前 $N_{\text{header}} - 1$ 个数据比特复制并添加到 $r[n]$ 尾部后得到的扩展数据

序列. 运算符 $|\cdot|$ 和 \sim 则分别表示向量的求模和取反运算. 容易看出,仅当以下两个条件同时满足时,无法从接收到的数据序列 $r[n]$ 中还原出原始的数据信息.

$$N_{\text{residual}} = \text{Mod}(N_{\text{redundant}}, N_{\text{data}}) \leq n_{\text{offset}} \quad (4)$$

$$flag = 0$$

其中, N_{residual} , N_{payload} 和 $N_{\text{data}} = N_{\text{header}} + 1 + N_{\text{payload}}$ 分别表示冗余段残余部分、数据载荷部分以及数据段的比特个数. $flag$ 表示数据段标识位的数据信息. 运算符 Mod 表示求余运算. 具体地,从连续拍摄图片中检测获取原始数据序列 $y[n]$ 的算法如算法 1 所示.

算法 1 数据帧组帧算法

输入: $r[n]$, N_{header} , N_{payload} , $N_{\text{redundant}}$

输出: $y[n]$

$N_{\text{data}} \leftarrow N_{\text{header}} + 1 + N_{\text{payload}} + 1$

$N_{\text{residual}} \leftarrow \text{Mod}(N_{\text{redundant}}, N_{\text{data}})$

$\tilde{r}[n] \leftarrow$ 使用 $r[n]$ 的前 $N_{\text{header}} - 1$ 个比特扩展 $r[n]$

使用公式(3)计算时间偏移 n_{offset}

if n_{offset} 存在 then

if $r[n]$ 中的 $flag$ 等于 1 then

for $i \leftarrow 1$ to N_{payload}

$y[i] \leftarrow \tilde{r}[\text{Mod}(i + n_{\text{offset}}, N_{\text{payload}})]$

end for

else if n_{offset} 小于等于 N_{residual} then

for $i \leftarrow 1$ to N_{000}

$y[i] \leftarrow \tilde{r}[\text{Mod}(i + n_{\text{offset}}, N_{\text{payload}})]$

end for

else

$y[n]$ 恢复失败, 发送数据重传请求

end if

else

$y[n]$ 恢复失败, 发送数据重传请求

end if

2.4 帧内损失和帧间损失

由于 OCC 链路收发端缺少反馈握手信号,连续拍摄照片的帧间间隔会随机出现在不同的位置,从而引发不可预测的数据丢失. 根据帧间间隔出现的位置和数据帧的长短,由收发端不同步和帧间间隔引发的数据丢失可以分为帧内损失和帧间损失. 如图4所示,当帧间间隔长度 T_{gap} 不大于数据帧长度 T_{frame} 时,会出现帧内损失或者帧间损失;而当帧间间隔长度 T_{gap} 大于数据帧长度 T_{frame} 时,会出现帧间损失或者帧内和帧间损失.

在图4(a)中,帧间间隔长度 T_{gap} 小于数据帧长度 T_{frame} ,会导致数据帧2发生帧内损失,数据帧3和4发生帧间损失. 使用图片1中检测获取的数据帧2的数据段数据,以及图片2中检测获取的数据帧2的冗余段数

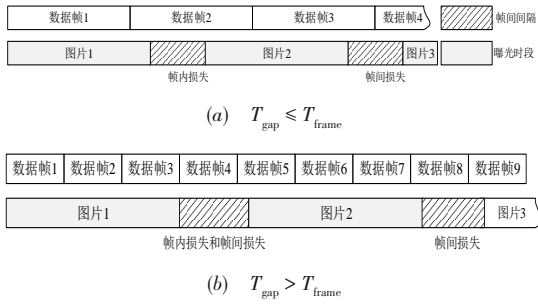


图4 帧内损失和帧间损失

据,就可以恢复出数据帧2数据载荷部分的数据. 同样地,数据帧3和4的帧间损失也可以通过类似的过程恢复出数据载荷部分的数据. 在图4(b)中,帧间间隔长度 T_{gap} 大于数据帧长度 T_{frame} ,会导致数据帧4发生帧内损失,数据帧3,5,8,9发生帧间损失. 其中,数据帧3,5,8,9的帧间损失可以通过图4(a)的过程恢复出对应数据载荷部分的数据;而数据帧4帧内损失则由于没有捕获到任何有效数据,无法恢复. 因此,为保证完整有效的无线数据传输,数据帧的每一部分的长度都应该谨慎选择.

3 系统性能分析

3.1 有效比特数

LED信号光源与相机接收机间距离 D ,相机成像距离 d 和相机成像镜头焦距 f 之间的关系可以表示为

$$1/f = 1/D + 1/d \quad (5)$$

根据相似三角形原理,LED信号光源的大小与拍摄图片上LED图像的关系可以表示为

$$s/S = d/D \quad (6)$$

其中, S 和 s 分别表示LED信号光源和LED图像尺寸相关的参数.LED图像中亮暗条纹的宽度 W_{stripe} (单位:像素行)可以表示为

$$W_{\text{stripe}} = 1/(t_{\text{read}} \cdot R_{\text{bit}}) \quad (7)$$

考虑到LED图像顶部和底部的条纹残余现象,从每一幅图片中可以有效检测的比特数可以表示为

$$N_{\text{stripe}} = \lfloor s/W_{\text{stripe}} \cdot W_{\text{pixel}} \rfloor - 1 \quad (8)$$

其中, W_{pixel} 表示像素行的宽度,运算符 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算.

3.2 OCC链路数据传输速率

每一张图片中可以检测获取的比特个数可以表示为

$$N_{\text{bit}} = \eta \cdot \frac{N_{\text{payload}}}{N_{\text{frame}}} \cdot N_{\text{ROW}} \cdot T_{\text{read}} \cdot R_{\text{bit}} \quad (9)$$

其中, $\eta = \frac{2}{3}$ 和 $R_{\text{bit}} \leq \frac{1}{T_{\text{read}}}$ 分别表示4B6B RLL码的编码效率和LED信号光源的时钟频率. 则OCC链路的数据传输速率可以表示为

$$R_{\text{throughput}} = N_{\text{bit}} \cdot R_{\text{frame}} \quad (10)$$

其中, $R_{\text{frame}} = 1/(T_{\text{open}} + T_{\text{gap}})$ 表示相机帧速率,通常为30,60或120fps.

OCC链路收发端不同步,LED信号光源与相机接收机间会出现随机的偏移,导致OCC链路数据传输速率的迅速下降. 由于LED信号光源与相机接收机间的偏移均匀分布在区间 $[0, N_{\text{frame}} - 1]$ 内,OCC链路丢帧率可以表示为

$$L_{\text{loss}} = 1 - \frac{N_{\text{redundant}}}{N_{\text{frame}}} = \frac{N_{\text{data}}}{N_{\text{frame}}} \quad (11)$$

其中, $N_{\text{frame}} = N_{\text{data}} + N_{\text{redundant}}$ 表示一个完整数据帧的长度.

3.3 相机角度姿态

相机接收机在移动过程中的随机抖动和转动会导致拍摄图片上LED信号光源图像大小、形状的频繁变化,从而引起从每幅图片中检测获取亮暗条纹个数的变化,最终引起OCC链路数据传输速率的不稳定,甚至会导致链路失效情况.

根据图5所示的相机成像模型,LED信号光源几何中心 A 点与其图片中LED图像中心 A' 点位置 $[u, v]^T$ 的关系可以表示为

$$[u, v]^T = f(N^P, N^P C, \text{Ang}, K) \quad (12)$$

其中, $N^P = [N^P_x, N^P_y, N^P_z]^T$ 和 $N^P C = [N^P C_x, N^P C_y, N^P C_z]^T$ 分别表示LED信号光源几何中心 A 与相机中心在导航坐标系中的位置坐标, $\text{Ang} = [\varphi, \theta, \psi]^T$ 表示相机的滚转角 φ 、方位角 θ 和俯仰角 ψ , $K = [f, C, p, k]^T$ 表示相机的内部参数成像镜头焦距 f 、相机成像透镜光学中心 C 、相机的径向扭曲参数 p 和切向扭曲参数 k .

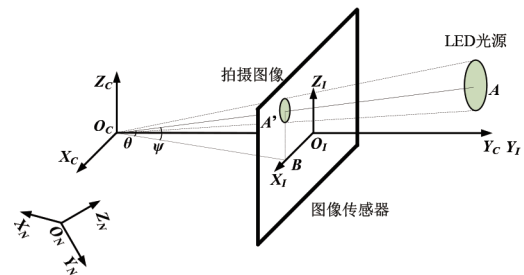


图5 相机成像原理

通过类似的过程,计算LED信号光源边沿上的每一个点在图片中的位置,就可以得到LED信号光源在图片中的真实图像. 那么,每一张图片中的亮暗条纹个

数需要改写为

$$N_{\text{stripe}} = \left\lfloor \frac{U_{\text{bottom}} - U_{\text{top}}}{W_{\text{stripe}}} \right\rfloor - 1 \quad (13)$$

其中, U_{top} 和 U_{bottom} 分别表示图片中 LED 图像顶部和底部亮暗条纹的位置.

3.4 数据帧结构参数最优化

为了解决帧间间隔引起的帧内损失和帧间损失, 并提高拍摄图片中亮暗条纹的利用率和 OCC 链路数据传输速率, 数据帧的长度应该满足以下条件:

$$\begin{aligned} N_{\text{frame}} &\geq T_{\text{gap}} \cdot R_{\text{bit}} \\ N_{\text{frame}} &\leq (T_{\text{open}} + T_{\text{gap}}) \cdot R_{\text{bit}} \\ N_{\text{data}} &\leq T_{\text{open}} \cdot R_{\text{bit}} \end{aligned} \quad (14)$$

OCC 链路的最大数据传输速率 $R_{\text{max_throughput}}$ 可以表示为

$$\begin{aligned} R_{\text{max_throughput}} &= \arg \max_{N_{\text{data}}, N_{\text{redundant}}} N_{\text{bit}} \cdot R_{\text{frame}} \\ \text{st.} \quad &\begin{cases} N_{\text{frame}} \geq T_{\text{gap}} \cdot R_{\text{bit}} \\ N_{\text{frame}} \leq (T_{\text{open}} + T_{\text{gap}}) \cdot R_{\text{bit}} \\ N_{\text{data}} \leq T_{\text{open}} \cdot R_{\text{bit}} \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

将式(10)、式(11)、式(14)代入式(15), OCC 链路的最大数据传输速率 $R_{\text{max_throughput}}$ 可以改写为

$$\begin{aligned} R_{\text{max_throughput}} &= \eta \cdot N_{\text{ROW}} \cdot T_{\text{read}} \cdot R_{\text{bit}} \cdot R_{\text{frame}} \\ &\quad \times \arg \max_{N_{\text{data}}, N_{\text{redundant}}} \frac{N_{\text{data}} - 7}{N_{\text{data}} + N_{\text{redundant}}} \\ \text{st.} \quad &\begin{cases} N_{\text{data}} + N_{\text{redundant}} \geq T_{\text{gap}} \cdot R_{\text{bit}} \\ N_{\text{data}} + N_{\text{redundant}} \leq (T_{\text{open}} + T_{\text{gap}}) \cdot R_{\text{bit}} \\ N_{\text{data}} \leq T_{\text{open}} \cdot R_{\text{bit}} \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

由于大多数相机的帧间间隔 T_{gap} 小于其曝光时段 T_{open} , 设置数据帧数据段的长度 N_{data} 等于相机曝光时段有效捕获的数据比特个数 N_{open} , 就可以获得 OCC 链路的最大数据传输速率 $R_{\text{max_throughput}}$, 即

$$R_{\text{max_throughput}} = \eta \cdot (N_{\text{ROW}} \cdot T_{\text{read}} \cdot R_{\text{bit}} - 7) \cdot R_{\text{frame}} \quad (17)$$

同时, 此刻 OCC 链路丢帧率 L_{loss} 为

$$L_{\text{loss}} = \frac{N_{\text{data}}}{N_{\text{frame}}} = \frac{N_{\text{ROW}} \cdot T_{\text{read}} \cdot R_{\text{bit}}}{N_{\text{frame}}} \quad (18)$$

4 实验结果分析

4.1 测试平台设计

为了测试 OCC 链路的系统性能, 本文设计搭建了如图 6 所示的测试平台. 一个直径为 10cm 的圆形平板灯被选作 LED 信号光源, 使用函数发生器 Gwinstek AFG-2225 产生的峰峰值为 5V 且频率为 5kHz 的方波信号, 与直流稳压电源提供的 12V 直流电压通过一个偏置器共同驱动点亮这个 LED 圆形平板灯. 在接收端, 一

个距离 LED 圆形平板灯 20cm 的 iPhone 6s 手机的前置摄像头被用作相机接收机. 其他相关的系统参数如表 1 所示.

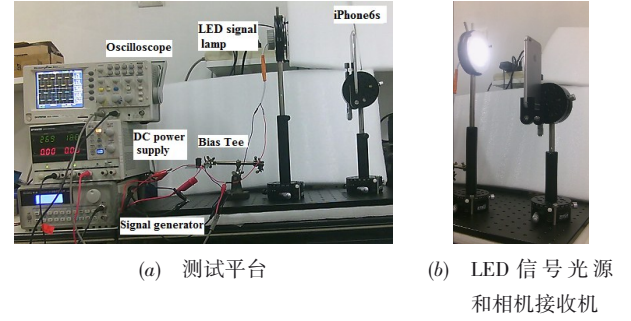


图 6 OCC 链路测试系统

表 1 OCC 链路系统参数

系统参数	取值
相机像素行数 N_{ROW}	1080
像素行读取时间 T_{read}	6.45us
拍摄帧速率 R_{frame}	30fps
相机曝光时间 T_{exp}	200us
相机径向扭曲参数 k	[0.031862, -0.101764]
相机切向扭曲参数 p	[-0.001285, 0.001716]
像素宽度 W_{pixel}	1.22um
成像透镜焦距 f	3mm
LED 面板灯直径 S	10cm
LED 面板灯额定电压	12V
LED 面板灯额定功率	3W
调制频率 R_{bit}	5kHz
收发两端距离 D	20cm

4.2 相机角度姿态对 OCC 链路的影响

为测试相机拍摄角度姿态对 OCC 链路性能的影响, 设定 LED 信号光源与相机接收机的距离为 20cm, 分别以 5° 为步长旋转相机的拍摄俯仰角和方位角, 可以得到图 7 所示的 LED 信号光源图片.

容易看出, 随着相机拍摄角度的不同, 即使拍摄距离保持不变, 拍摄得到的 LED 信号光源图像在图片中的位置也会有所不同. 当 LED 图像移出图片时, 会引起图片中亮暗条纹个数的减少, 从而导致 OCC 链路数据传输速率的下降. 图 7(b) 中 LED 图像的大小变化主要是由相机中心与旋转轴间的偏差引起的.

图 8 分别给出了拍摄图片中有效比特数与相机拍摄角度关系的仿真结果与测量结果, 每一个拍摄角度的测量结果都是在连续拍摄 30s 的视频后离线处理得出的. 其中, 图 8(a) 根据相机成像模型修正过的有效比特数计算式(13)仿真计算了相机在不同角度拍摄到图片中包含的有效比特数. 可以看到, 当相机拍摄俯仰角

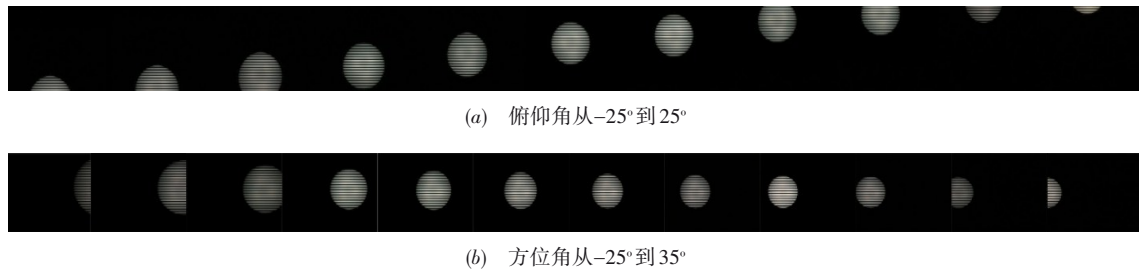


图7 拍摄到的LED信号光源图片

和方位角较小时(在 -10° 到 10° 之间),每幅图片中的有效比特数基本稳定在30个左右.当相机拍摄俯仰角和方位角逐渐增大时,每幅图片中的有效比特数会迅速减少,并减少至0.同时,最大比特数35出现在相机拍摄俯仰角为 4° 且方位角为 28° 的地方,而并非俯仰角和方位角均为 0° 的地方.这主要是由相机内部径向扭曲和切向扭曲效应,以及相机光学中心、图像传感器中心和相机镜头成像中心间的安装偏差等因素引起的.在图8(b)和图8(c)的数字仿真和实际测量结果间存在

较大的偏差,这主要是由LED图像上下边沿出的残余条纹,以及相机中心与旋转轴中心间的偏差引起的.最后,随着相机拍摄俯仰角在两个方向上的增大,图片有效比特个数的下降速度远大于方位角.这是因为相机俯仰角增大会使LED图像在图片竖直方向移动,直接导致LED图像覆盖像素行数的减小;而相机方位角增大仅使LED图像在图片水平方向移动,只有当LED图像竖直方向最大值移出图片时才会导致LED图像覆盖像素行数的减小.

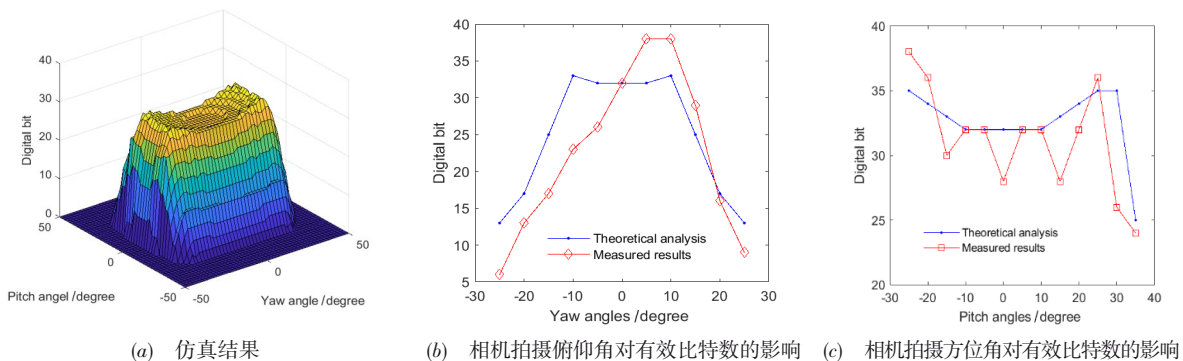


图8 相机拍摄角度对有效比特数的影响

4.3 最优数据帧参数分析

为保证使用不同相机OCC链路的可靠性和稳定性,并考虑用户的使用习惯,通常选取智能手机前置相机作为可见光

接收机.综合表2给出的几款常见手机前置相机的相关参数,本文针对相机像素行数 N_{ROW} 为1080,拍摄帧速率为30fps和帧间间隔占比为40%选取最优数据帧结构参数.

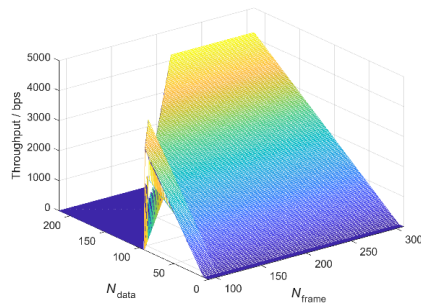
表2 相机接收机相关参数^[6]

手机品牌	手机型号	前置相机分辨率	拍摄帧速率	行像素读取时间(us)	拍摄帧间隔时间(ms/%)
苹果	iPhone 6 plus	1920×1080	30.00	21.42	10.20/30.60
苹果	iPhone 5s	1920×1080	29.98	20.65	11.03/33.10
苹果	iPhone 4s	1920×1080	29.87	24.38	7.04/21.03
HTC	New One	1920×1080	29.94	29.08	12.79/38.30
三星	Galaxy S4	1920×1080	29.93	25.53	5.84/17.48

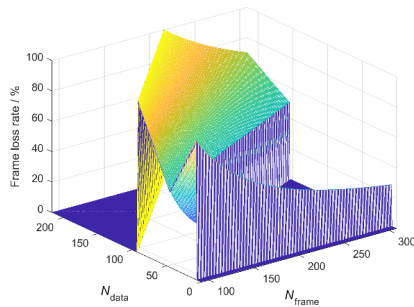
为简化计算,假设LED信号光源图像覆盖了所有像素行.根据OCC链路的最大数据传输速率 $R_{\text{max_throughput}}$ 计算式(16)、式(17)和OCC链路丢帧率 L_{loss} 计算式(18),图9分别给出了OCC链路数据传输速率、链路丢

帧率与数据帧长度 N_{frame} 和数据帧数据段长度 N_{data} 之间的关系.可以看出,当数据帧数据段长度 N_{data} 等于216,即 N_{data} 等于相机曝光时段内有效接收的数据长度 N_{open} 时,OCC链路的数据传输速率取得最大值4180 bps.然

而,为了保证 OCC 链路数据传输的完整性和连续性, OCC 链路不应该存在丢帧现象. 因此,在链路丢帧率等于 0% 的约束下, OCC 链路的最大数据传输速率下降至 2940 bps. 此时, OCC 链路数据帧数据段长度 N_{data} 和相机曝光时段内有效接收的数据长度 N_{open} 分别等于 154 和 308.



(a) OCC 链路数据传输速率



(b) OCC 链路丢帧率

图 9 OCC 链路性能与数据帧的关系

图 10 给出了使用不同相机接收机和不同数据帧结构的 OCC 链路数据传输速率. 容易看出,针对表 2 中不同品牌和型号的相机,使用本文设计的数据帧的 OCC 链路数据传输速率均优于使用交错 Hamming 码^[10]和 Raptor 码^[11-13]帧结构的 OCC 链路. 当 HTC 的 New One 手机和三星的 Galaxy S4 手机被用作可见光信号接收机时,使用本文设计的数据帧的 OCC 链路数据传输速率均达到 3353 bps, 这比使用 Raptor 码帧结构的 OCC 链路分别提高了 94% 和 45%.

根据以上的实验结果可以看出,基于 LED-相机 OCC 链路的数据传输速率约为几 Kbps, 可以应用于室内无线定位、短报文传输等数据传输速率不高的场合. 同时,也可以使用空分复用等方式,通过同时接收多路 LED 信号光源发送的数据,提高 OCC 链路的数据传输速率,以满足语音通话等对数据传输速率要求较高的场合. 而对于实时视频通话、高清视频实时传输等应用,则可以考虑使用基于光电子探测器或专用摄像/通

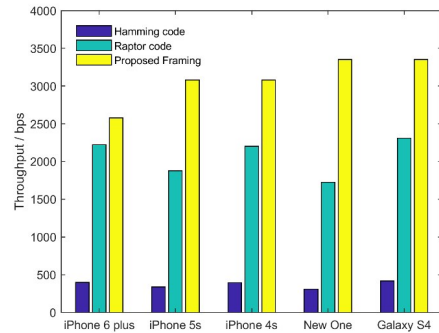


图 10 使用不同相机的 OCC 链路性能

信相机等高速可见光信号接收机,或者其他传统的射频传输技术.

5 结论

基于 LED-相机的 OCC 技术以其无需额外的硬件、极易推广使用等优势,已经成为 VLC 领域的一个热点研究方向. 然而,由于 OCC 链路单向传播和相机帧间间隔等因素的限制, OCC 链路存在着收发端不同步和严重的数据丢失问题. 本文在分析相机接收机卷帘快门工作机制的基础上,研究了 LED-相机 OCC 链路的基本工作原理,以及相机像素行数、像素行读取时间、拍摄帧速率、相机拍摄角度等因素对 OCC 链路数据传输速率、链路丢帧率等参数的影响,并针对 OCC 链路的特点,设计了一种新型的适用于 OCC 链路的数据帧结构. 通过对比分析可以发现,使用这种数据帧的 OCC 链路,可以有效地解决收发端不同步和相机帧间间隔引起的 OCC 链路数据丢失的问题;同时,在 OCC 链路数据传输速率和链路丢帧率方面,均优于现在常用的交错 Hamming 码和 Raptor 码帧结构. 最后,本文设计搭建了相关的 OCC 链路测试平台,通过对比数字仿真结果和实际测量结果,分析了相机接收机拍摄角度姿态对 OCC 链路数据传输速率的影响,并给出了数据传输完整性和连续性前提下的最优数据帧参数.

参考文献

- [1] 姜珊,胡贵军,王海燕,等. 基于彩色二维条码流的 Display-to-Camera 通信系统[J]. 电子学报, 2016, 44(4): 767-774. Jiang S, Hu G J, Wang H Y, et al. Colorful 2D code streaming for display-to-camera communication system[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(4): 767-774. (in Chinese)
- [2] Nguyen T, Islam A, Yamazato T, et al. Technical issues on IEEE 802.15.7m image sensor communication standardization[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(2): 213-218.
- [3] Chow C, Chen C, Chen S. Visible light communication us-

- ing mobile-phone camera with data rate higher than frame rate[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26080 – 26085.
- [4] IEEE 802.15.7-2018, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 15.7 Short-Range Optical Wireless Communications[S].
- [5] Bai B, Su B, Nan C, et al. A high precision positioning method based on high speed camera and visible light[A]. 2017 Asia Communications and Photonics Conference[C]. New York, USA: IEEE, 2017. 1 – 3.
- [6] Itoh S, Takai I, Sarker M S Z, et al. A CMOS image sensor for 10Mb/s 70m-range LED based spatial optical communication[A]. 2010 IEEE International Solid-State Circuits Conference[C]. New York, USA: IEEE, 2010. 1 – 3.
- [7] Chen C W, Chow C W, Liu Y, et al. Efficient demodulation scheme for rolling-shutter-patterning of CMOS image sensor based visible light communications[J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24362 – 24367.
- [8] Nguyen D T, Park Y. Data rate enhancement of optical camera communications by compensating inter-frame gaps [J]. Optics Communications, 2017, 394:56 – 61.
- [9] Yang F, Li S N, Yang Z, et al. Spatial multiplexing for non-line-of-sight light-to-camera communications[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(11): 2660 – 2671.
- [10] Yang Y B, Hao J, Luo J. CeilingTalk: Lightweight indoor broadcast through LED-camera communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(12):3308 – 3319.
- [11] Hao J, Yang Y, Luo J, et al. CeilingCast: Energy efficient and location-bound broadcast through LED-camera communication[A]. IEEE Infocom 2016 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications[C]. New York, USA: IEEE, 2010. 1 – 9.
- [12] Le N, Le T, Nguyen T, et al. Synchronization issue for optical camera communications[A]. 2015 7th International

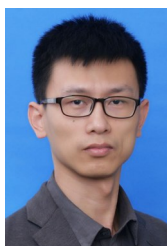
Conference on Ubiquitous and Future Networks[C]. New York, USA: IEEE, 2015. 1 – 5.

- [13] Guan W P, Wu Y X, Xie C Y, et al. Performance analysis and enhancement for visible light communication using CMOS sensors[J]. Optics Communications, 2018, 401: 531 – 551.

作者简介



白 勃(通信作者) 男,1985年7月出生,陕西咸阳人.现为西安电子科技大学通信工程学院副教授、硕士生导师.主要研究方向为无线光通信、无线定位技术.
E-mail:bbai@xidian.edu.cn



苏 博 男,1982年4月出生,陕西西安人.现为西安电子科技大学空间科学与技术学院副教授、硕士生导师.主要研究方向为无线通信技术.
E-mail:bsu@xidian.edu.cn



李静磊 男,1985年9月出生,河南洛阳人.现为西安电子科技大学通信工程学院讲师、硕士生导师.主要研究方向为无线通信技术.
E-mail:jlli@xidian.edu.cn



柯熙政 男,1962年10月出生,陕西临潼人.现为西安理工大学自动化与信息工程学院教授、博士生导师.主要研究方向为无线光通信技术.
E-mail:xzke@263.net