



基于高分辨率图像传感器的单帧光学相机通信

摘要

针对光学相机通信中存在的图像传感器有效像素受限以及多帧通信之间存在的通信不连续问题,提出利用高分辨率图像传感器在单帧图像中完整接收数据包的非视线信道通信方案.非视线信道的方案解决光源造成的 blooming 效应问题,并增加了图像传感器上的通信有效像素.同时,通过高精度的同步算法和多列信号累积,克服非视线信道带来的大衰减问题.高分辨率图像传感器可感知更高速的信号变化,从而有助于同步精度和通信速率的提高.实验结果表明:该方案可实现 1.5 m 距离上的 2.15 kbps 通信速率,单帧内数据包长度为 16 bit,满足室内定位导航、光子标记等应用需求.

关键词

光学相机通信;非视线信道;信号同步

中图分类号 O429

文献标志码 A

收稿日期 2017-02-09

资助项目 中国博士后科学基金(2015M581145);中国科学院国际对外合作重点项目(121835KYSB20160006);国家自然科学基金青年基金项目(61501427);福建省科技计划对外合作项目(2017101010012)

作者简介

戴永恒,男,博士,研究方向为智能信息处理与通信系统.toyhdai@163.com

汤璇(通信作者),女,博士,研究员,主要研究新一代无线通信技术.xtang@fjirsm.ac.cn

0 引言

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)在照明工程中的广泛应用使得可见光通信(Visible Light Communication, VLC)研究进展迅速.随着智能手机、数码相机和监控摄像头的推广,图像传感器也在现代生活中大量普及,记录和丰富了人们的生活.除图像和视频采集功能以外,图像传感器也越来越多地被用于 VLC.用图像传感器作为接收器的 VLC 被称作光学相机通信(Optical Camera Communication, OCC).近来,随着 OCC 在车联网、定位导航、增强现实、近场通信等应用领域需求的兴起, OCC 的研究引起国内外研究者的广泛兴趣(包括美国、英国、中国台湾、日本、韩国等国家和地区,以及北京邮电大学、中国科学技术大学等机构).目前 OCC 的系统方案主要有 3 类:单个 LED 与相机间(LED-to-Camera, LED2C)通信^[1-5]、LED 阵列与相机间(LED Array-to-Camera, LEDA2C)通信^[6-8]以及显示屏与相机间(Screen-to-Camera, S2C)通信^[9-10].其中后两者采用并行通信的方式,为避免并行信道间的串扰,通常基于视线(Line of Sight, LOS)信道;前者只有一个发射源,可依应用场景选择 LOS 信道和非视线(Non-Line of Sight, NLOS)信道.

单个 LED 与相机间(LED2C)通信可用于室内定位导航、增强现实等领域.在这些场景下,图像传感器通常部署在手持的智能移动终端上,如智能手机、平板电脑等,可同时完成图像采集和数据处理.LED2C 通信可基于 LOS 信道和 NLOS 信道.LOS 信道衰减较小,可实现较长的通信距离.但随着距离的增加,LED 灯在图像传感器上形成的图像就越小,通信有效的像素也越少,进而限制了通信速率.此外,LOS 信道需要对准高亮度的光源,既不方便使用,也容易造成 blooming 效应^[11].NLOS 信道衰减较大,但经过反射,取得两大优势.首先,反射扩大了光照明的范围,在远距离时依然可以在图像传感器上形成大量通信有效的像素,利于提高通信速率;其次,避免造成图像传感器的 blooming 效应.以室内定位导航为例,如图 1 所示,加载信息的 LED 灯光从天花板到地面(约 3 m 距离),经过地面反射再到智能手机(约 1.5 m).随着天花板到地面距离的增大,光照范围也将增大,从而有利于增加通信有效的像素.

在 OCC 中,作为接收机的相机可以选用定制相机^[12-13]或者货架产品,如智能手机和平板电脑等配备的相机^[4,14].Danakis 等^[4]采用智

1 中国电子科学研究院,北京,100041

2 中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究所,泉州,362000

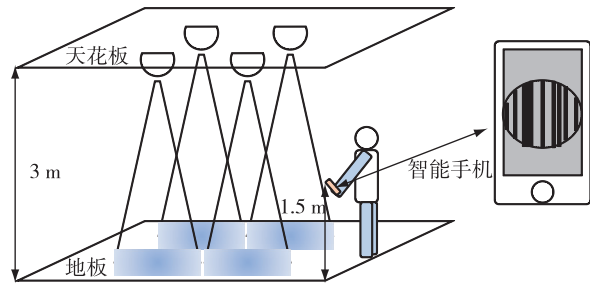


图1 基于 OCC 的室内定位导航

Fig. 1 OCC-based indoor positioning and navigation

能手机首次实现了基于 NLOS 信道的 LED2C 通信, 在 44 cm 的距离上速率达到 1 kbps. Rajagopal 等^[14] 利用智能手机和平板电脑演示了多通道的 LED2C 通信, 同时考虑了 LOS 信道和 NLOS 信道. 货架产品具有低成本优势, 利于 OCC 的实施与推广, 并可进一步推动 VLC 产业的发展与成熟, 但也具有两大缺点. 首先, 货架产品的相机, 优化目标是图像采集所需的大动态范围而非通信所需的响应速度^[15], 限制了通信速率提升; 其次, 操作系统的资源重分配^[4]、图像采集的帧率波动^[16] 以及帧之间的读取间隔^[5], 造成多帧图像间的接收中断.

为了解决 NLOS 信道的高衰减和货架产品的低响应速度与接收中断, 本文提出了采用高分辨率的卷帘门快门 (Rolling Shutter, RS) 相机实现单帧内有效的高速 OCC. 通过创新的同步算法和多列的累积, 提高了接收信号噪声比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR). 单帧通信在一帧图像内完成信息传输, 避免了多帧间的接收中断, 确保信息完整有效. 高分辨率传感器支持单帧内传输了足够数据, 满足室内定位导航、光子标记等应用需求. 本文接下来阐述卷帘门快门相机工作的基本原理、高分辨率单帧 OCC 方案和实验系统, 最后分析实验结果并做出结论.

1 卷帘门快门相机接收原理

数码相机按快门种类可分为全局快门 (Global Shutter, GS) 和卷帘门快门 (RS). 采用 GS 相机的 OCC 速率受限于相机的帧率 (约 30 fps), 而 RS 相机可以在单帧图像内接收多比特信息, 解决了相机低响应速度的问题, 极大地提升 OCC 速率. 图像传感器分辨率越高, 单帧图像可接收的比特数越多. 随着图像传感器工业的发展, 某公司的 IMX220 型图像传感器实现了 5 264×3 960 的分辨率, 并已应用到智能手机终端, 比如国内某公司的 MX 系列与国外某公司

戴永恒, 等. 基于高分辨率图像传感器的单帧光学相机通信.

的 XPERIA-Z 系列. 此外, 高达 2 400 万像素的 OV23850 型传感器也已发布^[17]. 高分辨传感器的出现与应用, 可支持更高通信速率和容量的单帧 OCC.

RS 相机的接收原理如图 2 所示. 按照 RS 相机的快门原理, 图像传感器上每列像素的产生包括曝光 (持续时间 t_e) 和数据读出 (持续时间 t_r). 数据依次读取, 每个时刻只能读取一列. 该列读取完成后, 即可开始下次曝光过程. 因此, LED 发射的光信号中每波特可被传感器上多列像素采样. 该采样方式在累积信号强度的同时带来混叠, 其特点可深入研究, 但不包括在本文中. 随着信息的调制, LED 光明暗变化, 相机则生成具有明暗条纹的图片. 通过对图片的处理和转化, 调制 LED 的信息可被解调出来. 从图 2b 可以看到, 帧之间存在数据读出时间缺口 (持续时间 t_g). 这势必影响基于多个连续帧的 OCC, 对可将完整数据包含在单帧内的 OCC 没有影响.

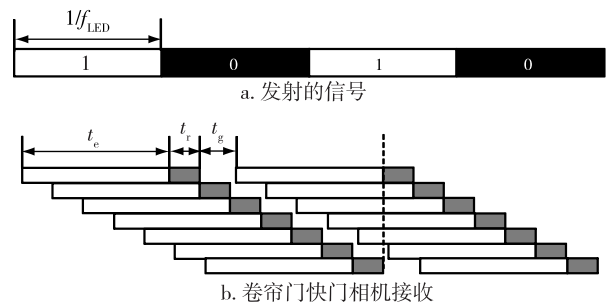


图2 卷帘门快门相机的接收原理

Fig. 2 Principle of signal receiving of rolling-shutter camera

2 OCC 方案与实验系统

采用 NLOS 信道的 OCC 系统包括基于 LED 的信号发射机、反射面以及基于 RS 相机的智能手机. 光信号采用强度调制, 通过改变驱动 LED 的电流实现. 同时为避免信号调制产生闪烁影响 LED 的照明功能, 发射机采用曼切斯特编码, 不会形成长“0”或者长“1”. 反射面可选择具有代表性的漫反射平面, 例如报纸、布面或者墙壁等. 智能手机选择具有高分辨率相机的型号, 同时选用开放性较好的 Android 系统, 便于解调程序在手机上运行.

解调程序包括 6 个主要模块, 如图 3 所示. 第 1 个模块实现 RGB 图像转为灰度图像, 有利于降低需要处理的数据量, 同时不丢失通信数据. 而尚未利用的颜色信息, 可在未来进一步提高数据传输速率. 第 2 个模块实现二维的图像转为二维的信号波形. 转化采用将每列像素灰度值求平均的方式. 第 3 个模块

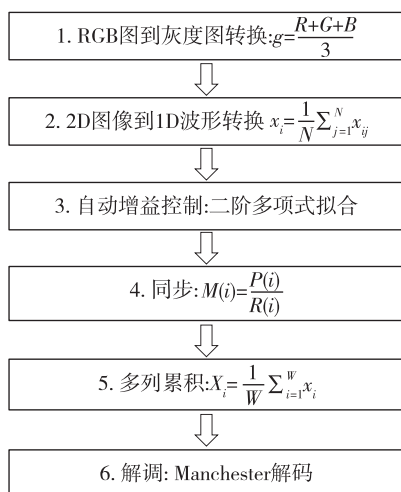


图3 解调程序主要模块

Fig. 3 Framework of demodulation process

实现自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC).由于LED照明灯具的设计,光照度存在不均匀的情况,通常中心位置照度高,边缘降低,造成信号波形平均功率的急剧变化,严重影响判决阈值的设定.受限于变化的剧烈程度,传统跟踪平均功率的AGC方案难以实现.通过多项式拟合的方式,是更为有效的方法^[4-5].

第4个模块实现信号的同步,确定通信符号的起始位.与其他系统的起始位判断不同^[4,14],高分辨率单帧OCC系统要求像素级的同步精度.起始位偏移一个像素列即可造成信号SNR的显著降低.在实验结果与分析部分,将进一步说明此问题.在通信方案中,正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统的同步模块可以提供高精度的同步效果.参考OFDM的方案,本文采用添加同步训练符号的方法实现OCC信号序列的同步,如图4所示.

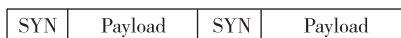


图4 同步训练符号与载荷

Fig. 4 Synchronization training symbol and payload

同步训练符号的设计是关键.高分辨率单帧OCC虽然具有比低分辨率OCC更多的采样点数^[4-5],但却远远少于传统OFDM系统的采样点数,因此必须使用很短的同步训练符号,以提高有效载荷比率.由于发射端采用了曼切斯特编码,因此不可能出现连续的3个0.利用此特点,本文选用“0001”作为同步训练符号SYN,并利用以下算法实现通信

符号的同步.

$$M(i) = \frac{P(i)}{R(i)}, \quad (1)$$

$$P(i) = \sum_{k=0}^{l-1} r(i+k) \cdot r(i+k+l), \quad (1)$$

$$R(i) = \sum_{k=0}^{l-1} r(i+k) \cdot r(i+k), \quad (1)$$

$$l = 3 \cdot \frac{1}{f_{LED} \cdot t_r}, \quad (1)$$

其中 $M(i)$ 是同步指示函数,当 $M(i)$ 取得最大值时,为通信符号的起始位, $r(i)$ 是信号波形, l 是同步符号经相机采样后的长度, f_{LED} 是发射端的调制频率.

$M(i)$ 取得最大值时, $R(i)$ 必位于“000”区域,且由于噪声的存在, $R(i)$ 为一非零极小值.其他区域由于连续3位中必存在一个“1”,因而只有极小概率可产生比此区域更小的 $R(i)$ 值.在那样的情况下,“1”的灰度值已经低于“0”的灰度值,即系统噪声已经严重到无法实现通信.

实现同步后,如前所述,LED发射的光信号中每波特可被传感器上多列像素采样,通过累加多列的像素灰度值可以提高信号能量,即提升NLOS信道中微弱信号下的SNR.

第5个模块通过确定光信号每波特被采样后形成的像素列数,将各列灰度值累加得到每个波特的最终灰度值.每波特被采样后形成的像素列数可由两个同步训练符号SYN之间的像素列数除以图4中载荷的波特数求得.第6个模块取灰度值的平均值作为判决阈值,得出“1/0”判决后,通过曼切斯特解码解调出LED发射的数据.

为分析OCC方案的性能,本文利用如图5所示的实验系统.系统包括LED驱动电路、LED灯、反射面和智能手机.LED驱动电路采用芯片NU511设计,

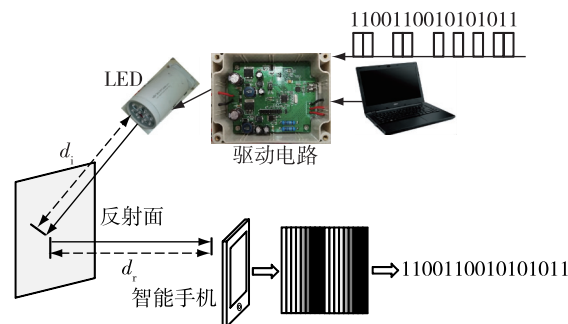


图5 基于NLOS信道的OCC系统

Fig. 5 OCC system based on NLOS channel

时钟频率为 10 kHz.发送数据通过便携式计算机加载到驱动电路,驱动电路采用驱动电流脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)的方式实现 LED 光强度的控制.PWM 调制既可实现照明光的调节,也可以通过改变占空比控制照明光的直流成分,抑

制可能出现的闪烁现象.LED 灯由 7 个 LED 灯珠组成,总功率为 7 W.反射面选用普通的打印纸.智能手机选择配备 IMX220 型图像传感器的 MX4 手机,关键参数设定如表 1 所示.

表 1 相机与智能手机的关键参数

Table 1 Key parameters of camera and smartphone

相机参数	数值	单位	手机参数	数值	单位
曝光时间	125	μs	数据读出时间 t_r	8.5	μs
分辨率	2 624×1 968	pixel	操作系统	Android 4.4	
ISO	1 600	1	CPU 频率	2.2	GHz
帧率	60	fps	内存	2	GB

3 实验结果与分析

实验中,LED 发送的数据包是 16 位“0111101111101010”.经过曼切斯特编码和添加同步训练符号,数据包长度增加到 36 位“000101101010100110101010100110011001”.可以看到,数据包中只有 SYN 符号出现了 3 个连续的“0”.数据包循环发送,无闪烁现象出现,不影响 LED 的照明功能.LED 灯到反射面的距离 d_i 设定为 1 m,反射面到智能手机的距离 d_r 设定为 0.5 m.使用 HCJYET 的 HT-1300 型照度仪,测量反射面处的光照度和智能手机处的光照度分别为 200 和 30 lux.根据 ISENA 的规定^[18],200 lux 是室内阅读环境推荐的照度,具有典型性,这也是距离 d_i 选定为 1 m 的原因.为了探测弱光信号,相机的 ISO 设定为 1 600.图像传感器分辨率设定为 2 624×1 968,远远高于其他 OCC 通信所使用的传感器分辨率^[4-5].

高分辨率图像传感器采集的单帧图像如图 6a 所示.经过解调程序的第 1 和第 2 模块转换,得到接收信号波形,数据点数为 1 968,与图像传感器列数一致.

从图 6c 可以看到,信号的平均功率波动剧烈,需要 AGC 模块完成功率变化的跟踪.如前所述,通过二阶的多项式拟合^[4-5],如图 7 所示,可以看到,在波形的大部分区域,二阶多项式拟合性能良好,但是在信号很弱的末端,二阶多项式拟合效果较差,需要进一步优化.为规避此问题,本文使用了较短的数据包,即在平坦区域已经可以包含完整的数据包,不影响后续的解调程序.

经过 AGC 后,同步模块计算同步指示函数,函数波形如图 8 所示.图 8 中插图显示峰值处没有平台

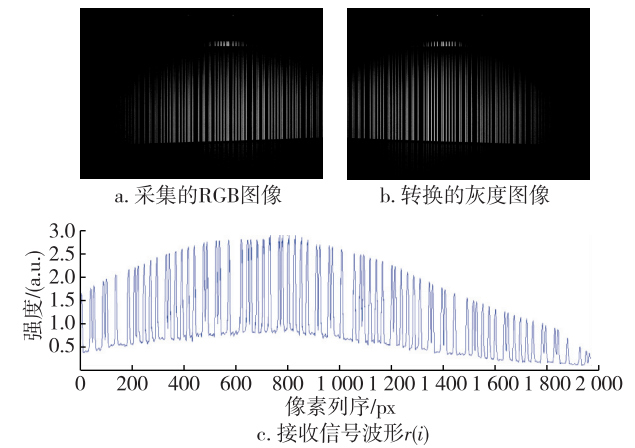


图 6 图像到接收信号波形的转换

Fig. 6 Conversion of image to received signal

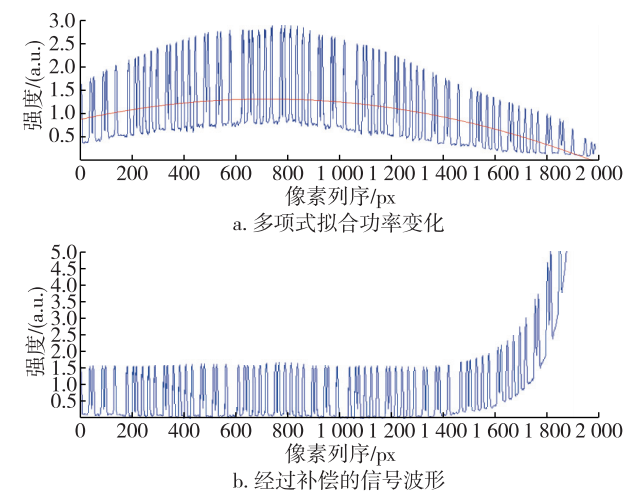


图 7 信号波形与多项式拟合

Fig. 7 Received signal waveform and polynomial fitting

区域,可实现精确的同步.由于发射端 LED 与接收端

智能手机完全没有时钟信号关联,因此每波特对应的像素列数不能预先设定,必须根据同步指示函数计算.在同步指示函数波形中,2个峰值点之间的像素列数计算为427列.因此,每波特对应的像素列数为 $436/36 \approx 12.11$ 列.像素列数总数为1968,即对应163个波特.同时,数据包长度为36,单帧图像内将包含约4.5个完整数据包,即可以包含4~5个SYN同步训练符号.图8中的同步指示函数出现了5个峰值,即有5个SYN同步训练符号出现在单帧图像中,符合计算结果.

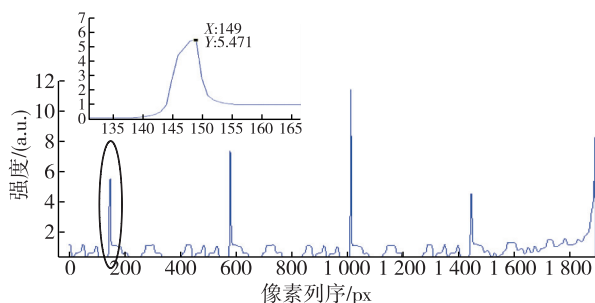
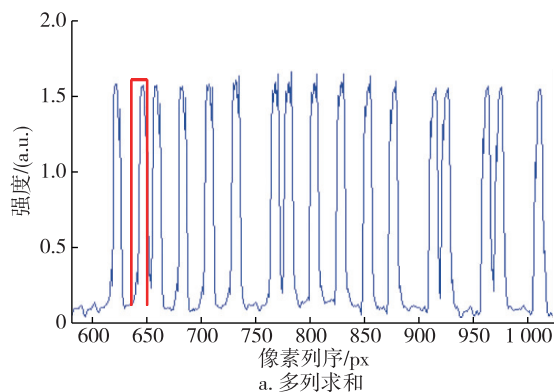


图8 同步指示函数的波形

Fig. 8 Waveform of synchronization indicator $M(i)$

根据同步指示函数给出的信息,从起始位开始,每12列像素的灰度值累加得到发射信号每个波特的灰度值.注意到,每波特对应的像素列数准确值为12.11列,因此每9个波特即需调整一次,跳过一个像素列,将累积的0.99列误差清除.本文选择第二个数据包起始位,经过多列求和提高信号强度的结果如图9所示.在图9b看到,根据判决阈值与1和0的灰度值,可以零错误地恢复LED发射的数据为“000101101010100110101010100110011001”.在高分辨率单帧OCC中,难以在有限的数据包中增加纠错



a. 多列求和

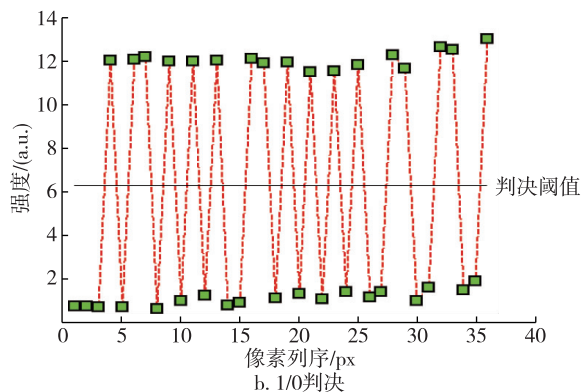
编码,因此通过提高信号强度,保证数据无错误地恢复是较好的选择.

由于智能手机完成16 bit数据包的接收所需时间约为436列像素数据读出时间,因此数据传输的速率约为4.3 kbps.考虑到LED与智能手机间的不同步,数据包必须重复发射2次才能保证在任意时刻,相机都可以捕获到一个完整的数据包,因此净数据传输速率为2.15 kbps.在2.15 kbps的速率下,单帧内可传输的数据包最长可达36 bit,可充分满足室内定位导航^[14]、光子标记等应用需求.本方案中的通信速率与通信距离与其他NLOS信道OCC方案相比^[4,14],都有较大提升.

为说明像素级同步精度在高分辨率单帧OCC中的重要性,我们比较了不同同步偏差情况下信号的恢复情况,如图10所示.可以看到,当偏移量达到4个像素列以后,信号劣化已经非常严重,产生数据恢复错误.

4 结束语

针对光学相机通信中存在的图像传感器有效像素受限以及多帧通信之间存在的通信不连续问题,本文提出利用卷帘门快门的高分辨率图像传感器在单帧图像中完整接收数据包的非视线信道通信方案.实验表明,该方案可以在1.5 m的非视线信道上实现2.15 kbps的光学相机通信,单帧内实现接收16 bit的数据包,并可提升至36 bit,满足室内定位导航、光子标记、LED-ID等多种应用需求.未来,通过进一步研究卷帘门快门相机的采样特性、改进自动增益控制算法、利用颜色特性等,高分辨率单帧NLOS-OCC可以实现更高的通信速率和接收更大的数据包.



b. 1/0判决

图9 多列求和与判决阈值

Fig. 9 Integration(a) and decision level(b)

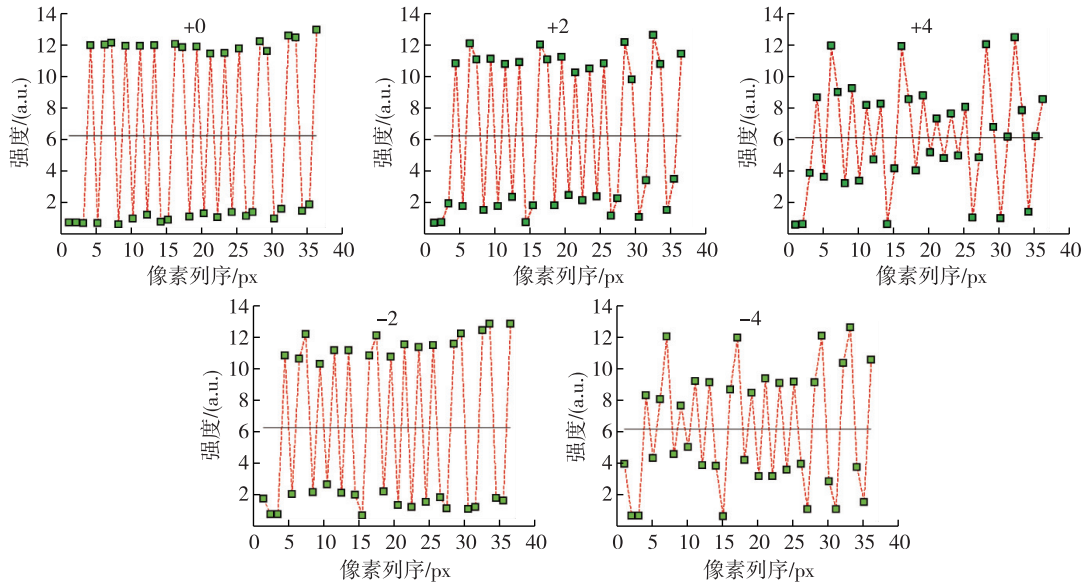


图 10 同步偏移对信号恢复的影响

Fig. 10 Influence of synchronization bias on signal recovery

参考文献

References

- [1] Chow C W, Chen C Y, Chen S H. Enhancement of signal performance in LED visible light communications using mobile phone camera [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5), DOI:10.1109/JPHOT.2015.2476757
- [2] Luo P, Zhang M, Ghassemlooy Z, et al. Experimental demonstration of RGB LED-based optical camera communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5), DOI:10.1109/JPHOT.2015.2486680
- [3] Luo P, Zhang M, Ghassemlooy Z, et al. Experimental demonstration of a 1024-QAM optical camera communication system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(2):139-142
- [4] Danakis C, Afgani M, Povey G, et al. Using a CMOS camera sensor for visible light communication [C] // IEEE Globecom Workshops, 2012:1244-1248
- [5] Chow C W, Chen C Y, Chen S H, et al. Visible light communication using mobile-phone camera with data rate higher than frame rate [J]. Optics Express, 2016, 23(20):26080-26085
- [6] Cahyadi W A, Kim Y H, Chung Y H, et al. Mobile phone camera-based indoor visible light communications with rotation compensation [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2), DOI:10.1109/JPHOT.2016.2545643
- [7] Huang W, Tian P, Xu Z Y. Design and implementation of a real-time CIMMIMO optical camera communication system [J]. Optics Express, 2016, 24(21):24567-24579
- [8] Ebihara K, Kamakura K, Yamazato T. Layered space-time coding using LED array for image-sensor-based visible light communications [C] // IEEE International Conference on Communications, 2015:5048-5053
- [9] Du W, Liando J C, Li M. SoftLight: Adaptive visible light communication over screen-camera links [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications, 2016:1-9
- [10] Boubezari R, Minh H L, Ghassemlooy Z, et al. Smartphone camera based visible light communication [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(17):4120-4126
- [11] Fellers T J, Davidson M W. Concepts in digital imaging technology: CCD saturation and blooming [J]. Archived at the Wayback Machine, 2014
- [12] Imai Y, Ebihara T, Mizutani K. High-speed visible light communication with image sensor of the low frame rate and polygon mirror [C] // IEEE Global Conference on Consumer Electronics, 2014:434-438
- [13] Deguchi J, Yamagishi T, Majima H, et al. A 1.4 Mpixel CMOS image sensor with multiple row-rescan based data sampling for optical camera communication [C] // IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, 2014:17-20
- [14] Rajagopal N, Lazik P, Rowe A. Visual light landmarks for mobile devices [C] // Proceedings of International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2014:249-260
- [15] Li L Q, Hu P, Peng C Y, et al. Epsilon: A visible light based positioning system [C] // Proceedings of the 11th USENIX Conference on Networked Systems Design & Implementation, 2014:331-343
- [16] Hu W J, Gu H, Pu Q F. LightSync: Unsynchronized visual communication over screen-camera links [C] // Proceedings of ACM MobiCom, 2013:15-26
- [17] OmniVision. 23-megapixel image sensors [EB/OL] [2017-01-03]. <http://www.ovt.com/products/category.php?id=35>
- [18] Illumination Engineering Society of North America. The IESNA lighting handbook [M]. 9th Ed. New York, NY: IESNA, 2000

Optical camera communication using high-resolution image sensor within a single frame

DAI Yongheng¹ TANG Xuan²

1 China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041

2 Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institute, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362000

Abstract In order to increase the effective area of image sensor and to avoid the interruption of communications in optical camera communications (OCC), a novel non-line-of-sight (NLOS) OCC scheme is proposed, which uses a high-resolution image sensor to receive completely a data packet within a single frame. The NLOS channel profits the mitigation of the blooming effect from the optical source, and also the increment of effective area of an image sensor for communications. Furthermore, the high-accuracy synchronization scheme has been adopted for the integration of multiple pixel columns to mitigate the signal loss in an NLOS channel. High-resolution image sensor has been applied for fast signal variation, as well as the increment of both synchronization accuracy and the data rate. The performances of OCC system with the data rate of 2.15 kbps and a link range of 1.5 m has been verified experimentally. It has shown that a data packet of 16 bits could be reliably received within a single frame, which is applicable for indoor positioning and navigation, photonics labeling, and so on.

Key words optical camera communication; non-line of sight channel; synchronization