

基于相机的可见光通信技术

张民¹, 罗鹏飞², 冯淑兰², ZHANG Philipp³

1. 北京邮电大学, 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876
2. 深圳市海思半导体有限公司海思研究部(北京), 北京 100085
3. 深圳市海思半导体有限公司海思研究部(美国), 德州布兰诺, 美国 75075

摘要 可见光通信(VLC)有效结合了发光二极管(LED)的绿色照明和通信两大优点,是无线光通信的研究热点之一。基于相机VLC系统(简称OCC系统)在智能手机越来越普及的潮流下受到了广泛的关注和研究。OCC系统以照明LED为信号光源而以相机中图像传感器(IS)为信号接收器件,具有天然空间分集接收能力,因此具有广泛的应用前景。由于IS与传统光电二极管(PD)在可见光信号的接收与处理过程有明显不同,原有基于PD的VLC相关通信技术无法直接应用于基于IS的VLC系统。本文阐述了OCC系统的关键技术,并给出了相关应用场景。

关键词 可见光通信;图像传感器;欠采样;应用场景

随着LED技术的发展,能效高、体积小、寿命长的LED灯被广泛应用于室内外照明、信号呈现与指示、屏幕展示等领域。另外由于LED时间响应特性好,信号可通过肉眼观测不到的高速明暗闪烁发送出去,从而具有作为光通信系统信号发射器的潜力。因此,以照明LED为信号光源、以可见光波段为信息载体的可见光通信(VLC)正成为照明、通信界日益关注的热点技术^[1]。与传统的无线通信技术相比,VLC这种新型的无线通信技术具有以下特点^[2]:具有约300 THz的免费频谱因而带宽潜力更大;属于视距或准视距通信方式,信号无法穿透或绕过障碍物,因信号泄露而带来的安全性隐患很小;无射频辐射,对人体无害,是一种绿色环保的通信技术。目前,VLC仍面临一些技术难题亟待解决,例如多个LED信号源之间的光线干扰、采用波分复用(WDM)技术时接收端体积过大、因视距传输而移动性不佳等问题。

VLC系统通常采用光电二极管(PD)作为接收器件,将接收到的各种波段光都转换成电流,易受外界背景光和杂散光的干扰。此外,PD的探测面积较小(仅为 mm^2 量级),在通信距离为 m 量级时,仅能接收到非常微弱的光功率,限制了通信速率 R_b 及通信距离 $d^{[3]}$ 。为此,通常要在PD前装配光学透镜组以提高VLC系统的通信距离和速率,但此时收发端必须严格对准,降低了系统灵活性。同时加装了透镜的单个PD很难同时接收到来自多个LED的光信号,影响了接收端移动过程中的信号切换。

其实,VLC系统还可以采用IS作为接收器件。IS实际上

是众多PD阵列构成的,每个PD为IS的一个像素,可独立接收信号。当IS与成像透镜的共同工作时,来自不同方向的光线会被聚焦在IS上的不同位置,从而可实现图片或视频的接收。对于IS的每个像素来说,其输出信号的强度与接收的光功率及光谱分布相关,通常正比于接收到的光谱密度 $S_r(\lambda)$ 与像素响应度 $R(\lambda)$ 的积分。在每次曝光后,相机的读取电路会对所有像素点在曝光过程中产生的光生电荷进行读取及量化,最终得到一张照片的原始数据^[4]。

因此基于IS的接收器是一种天然的空间分集光接收器,可有效解决多LED(位置不同)同时发射信号时的干扰问题,配合图像多输入多输出(MIMO),此类接收器还可实现信号的并行接收。图1给出了相机空间分离特性示意。由图1可知,在镜头的作用下,来自不同方向的光被聚焦到了IS的不同位置,又由于IS内置有红绿蓝(RGB)滤光片,接收到光信

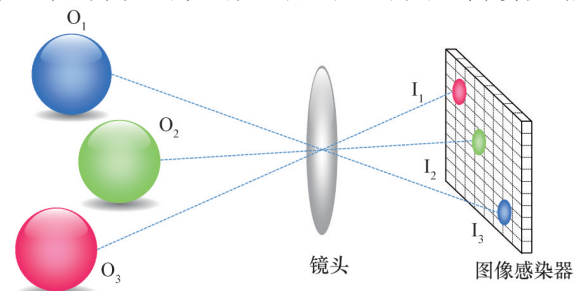


图1 相机的空间分离特性示意图

Fig. 1 Diagram of spatial separation of a camera

收稿日期:2016-06-30;修回日期:2016-07-29

基金项目:国家自然科学基金项目(61372119)

作者简介:张民,教授,研究方向为光通信系统与网络,电子信箱:mzhang@bupt.edu.cn;罗鹏飞(通信作者),工程师,研究方向为可见光通信、相机通信,电子信箱:oliver.luo@hisilicon.com

引用格式:张民,罗鹏飞,冯淑兰,等.基于相机的可见光通信技术[J].科技导报,2016,34(16):82-89;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.009

号的颜色信息也可被完整的记录下来,因此可分析不同的颜色来还原发送信息。

文献[5]表明,iPhone 前后摄像头的视场角(FOV)均大于 50° ,这也使得基于摄像头/图像传感器的 VLC 接收端具有一定的灵活性。又由于彩色图像传感器在每个 PD 像素前都已安装 RGB 滤光片,因此基于彩色 IS 的接收器可视为天然的 WDM 接收机,具备波分并行接收信号的潜力。目前,手机、汽车等设备均已内置了 LED 光源、摄像头等模块,虽然这些光源和摄像头仅用于照明和拍摄视频,但这给基于 IS 的 VLC 系统的实际应用铺设了硬件基础。仅需简单改造即可实现使用 LED 光源和摄像头的相机通信(OCC),进而实现手机信息、车辆位置、方向信息的交换,可为智能交通系统(ITS)提供新型通信技术,提高人们的生活质量与交通安全。

目前 OCC 领域主要有两大热点,分别是:如何使用普通帧率相机(20~60 fps)实现更高速率的信息传输;如何减小因发送 VLC 信号而引入的闪烁。由于常见相机的帧率较低(< 60 fps),而肉眼的闪烁截止频率 f_{\max_eye} 为 100 Hz,因此若直接采用开关键控(OOK)调制,根据奈奎斯特采样定理,信号发射频率需设定为相机帧率的 1/2 以下($< 10 \sim 30$ Hz)才能实现 OOK 信号的完整接收,如此低的发射频率会让人眼观察到 LED 闪烁。为了解决采用普通帧率相机进行信号收发而实现无闪烁通信的问题,文献[6]提出了一种欠采样频移开关键控(UFSOOK)调制方式。UFSOOK 系统让相机工作在欠采样模式下,因载波频率 f_s ($f_s > f_{\max_eye}$)和相机帧率 f_{camera} 的特殊关系,实现用相机完整的接收所发送的原始信号。文献[7]提出一种基于偏振片+液晶模块+色散器的相机通信机制,在发送端使用偏振片、液晶模块和色散器可改变发送光的偏振角度颜色,而人眼观察不出白光的闪烁及颜色变化。因此在接收端摄像头前可使用一片偏振片将含有信号的颜色信息接收,实现无闪烁信号的接收。文献[8]利用基于互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器的卷帘快门(RS)特性进行信号的收发,信号经过曼彻斯特编码后以 $1/t_{shutter}$ ($t_{shutter}$ 为曝光时间)量级的速率发射给相机,此时相机可采集到明暗变化的条纹信息,采用图片处理的方法即可把明暗条纹还原为原始比特数据。由于此方式下信号发射频率远高于人眼闪烁截止频率,因此该方案通信时人眼观察不到闪烁,但为了能拍摄到大面积清晰的明暗条纹,收发端不能相距太远,因此通信距离受到限制。为了提高 OCC 通信速率,文献[9]、[10]采用 1024 阶正交幅度调制(1024-QAM)、图像 MIMO 和 WDM 技术实现每帧采样到的 LED 信号含有更多数据信息。文献[11]同样也利用了彩色相机的颜色分离特性及 CMOS 传感器的 RS 特性,在发送端使用三色 LED 实现颜色键控(CSK)实现了高速信号传输。

1 图像传感器的结构及工作原理

相机由镜头、图像传感器和其他辅助模块构成。图 1 给

出了相机成像的基本原理:入射光通过镜头被聚焦到焦平面形成倒立的影像,位于镜头后方的图像传感器将汇聚的二维影像转换为电信号并通过后续处理得到数字照片。由图 1 同样可看出:图像传感器的核心为 PD 阵列。真实情况下每个像素点的尺寸为 $1 \sim 10 \mu\text{m}^{[12-13]}$,因此可以在很小尺寸下容纳约 10^7 个像素点。由于 PD 为宽光谱探测器,只要在其感光范围内的光信号均可使 PD 产生光生电流,为了实现用 PD 进行彩色信号探测,Bayer 提出在每个像素点前均安装一块彩色滤光片,使得滤光片后方的 PD 仅能探测通过滤光片后的光信号。图 2 给出了 Bayer 提出的滤光片阵列。如图 2 可知,该结构由重复的 RGB 滤光片组成,每个最小单元含 1 个红色、2 个绿色和 1 个蓝色滤光片(由于人眼对绿光最敏感,因此 RGB 比例为 1:2:1),再通过插值算法即可使得每个像素都具有 RGB 信息。这种 Bayer 滤光片结构也给 OCC 系统提供了天然的 WDM 保证,使得基于 IS 的 VLC 系统不仅可探测总接收光功率数值,还能探测 RGB 三色光独立光功率。另外基于镜头+PD 阵列的接收方式可使接收器接收来自不同方向的光信号,从而可显著降低信号干扰并实现信号的空分复用(SDM)。有效的利用图像传感器的每一个模块可对信号在空间、波长、时间等多维进行复用,提高信号的频率利用率。

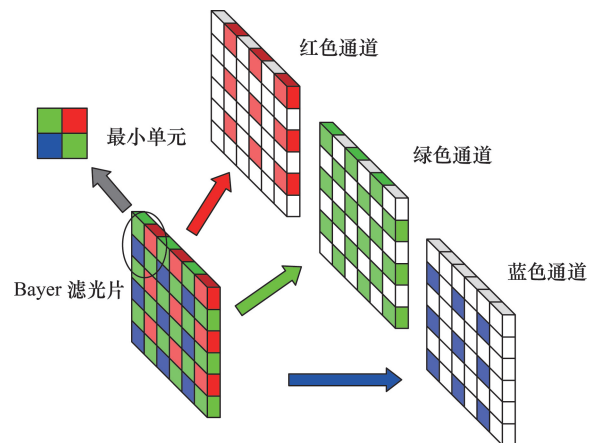


图 2 Bayer 滤光片阵列结构

Fig. 2 Structure of Bayer filter array

根据对图像传感器的 PD 阵列读取方式分类,IS 可主要分为全局曝光(GS)和卷帘快门曝光两种类型。目前数码相机或手机摄像头大都使用 CMOS 传感器作为感光器模块,此类感光器主要以卷帘快门方式工作,从而具有很高的行采样率。

图 3 给出了 GS 和 RS 两种曝光模式。由图 3(a)可知,在全局曝光模式下,IS 每隔 $1/f_{camera}$ 时刻曝光一次,每次曝光时所有像素点在同样时刻($t_{shutter}$)内进行曝光,曝光结束后统一读出。这种曝光模式的好处在于 IS 中的每个像素同时曝光,没有时延。对于卷帘快门曝光模式,如图 3(b)所示,IS 的每一行作为一个最小曝光单元,同一行中所有像素的曝光起始+

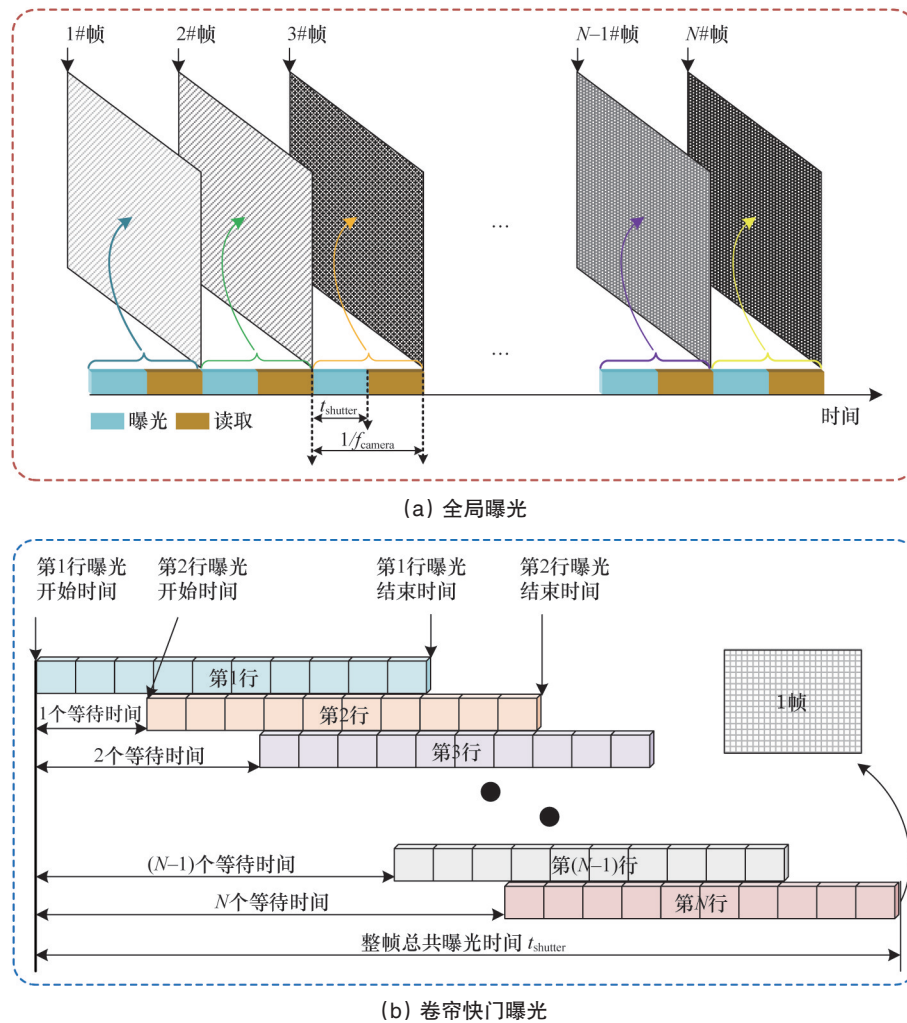


图3 两种图像传感器曝光模式示意

Fig. 3 Diagram demonstrating two frame capturing processes

结束时间相同,当最后一行像素曝光完成后即完成了一帧的曝光动作。由图3可知,当IS工作在全局曝光模式下,同一帧任何像素点的曝光起始和终止时间相同,而当IS工作在卷帘快门曝光模式下,IS上部的像素比下部像素曝光要稍早,因此同一帧图片在图片上下不同位置包含了不同时刻的信息,从而可很好的利用这个特性实现信号的发送及接收。

2 OCC系统调制方式

根据相机工作模式不同,OCC系统可主要采用2种调制(信号加载)方式:基于LED灯亮灭状态和基于图案明暗条纹。

2.1 基于LED灯亮灭状态的调制方式

对于普通IS,帧率局限在20~60 fps,因此不能直接采用OOK调制,否则肉眼可觉察到LED的闪烁。文献[14]提出一种名为欠采样相移关键控(UPSOOK)的无闪烁调制方式,该方案较UFSOOK具有更高的频谱效率,可实现1 bit/Hz/LED的频谱利用率,而UFSOOK频率效率仅0.5 bit/Hz/LED。UPSOOK基本原理如图4:原始数据为图4(a),每帧信号最开始为FH,其后为原始比特序列(FH代表信号帧头为一串频率

高于IS时间分辨率(f_{\max_camera})的“0,1”序列,由于FH的频率非常高,经过LED发送的FH波形通过相机接收后,高速的“0,1”亮度在 $t_{shutter}$ 时刻内被累加,因此发送FH的LED通过相机观察到其亮度约为常亮的1/2,因此可作帧头,标明信号边界)。由图可知每个比特(含FH)持续时常为 t_{camera} ($t_{camera}=1/f_{camera}$),UPSOOK将比特“1”和比特“0”用已载波为 $f_s=m \cdot f_{camera}$ (m 为整数, $f_{\max_eye} < f_s < f_{\max_camera}$),相位相差 180° 的方波来代表,如图4(b)所示。

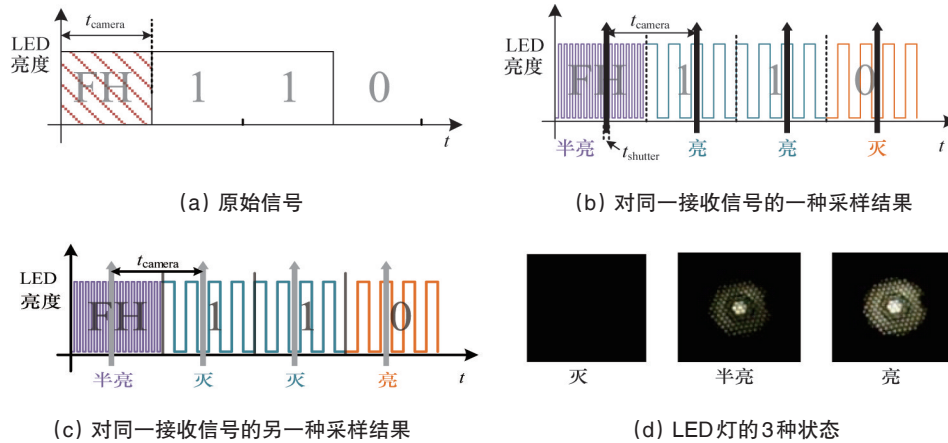
由第1节已知无论是GS还是RS型的IS,摄像机工作时会每隔 t_{camera} 拍一次照片,每张照片曝光 $t_{shutter}$ 。因此这种工作模式与积分清零滤波器工作类似:每 t_{camera} 对时常为 $t_{shutter}$ 的信号进行一次积分并清零。因此若摄像机在拍摄一个发送UPSOOK信号的LED,则可观察到LED灯的明暗状态在不断的改变,又因载波 f_s 高于 f_{\max_eye} ,人眼则观察不到此信号的闪烁。

虽然相机帧率和发送信号波特率及载波频率有精确的对应关系,但因相机的采样相位和发送信号相位无法同步,因此相机采样时刻具有随机性,这样会导致采样到的LED亮灭状态存在两种可能。如图4(b)和(c)所示,对于发送相同

信号的LED灯+摄像机接收系统,因IS采样位置(积分开始时刻)不同,导致接收到的LED状态除FH状态除外其他状态完全相反。图4(b)中探测到的LED状态和图4(a)中原始数据一一对应(“亮”对应“1”;“灭”对应“0”),但图4(c)中探测到的LED状态和图4(a)中原始数据完全相反(“亮”对应“0”;“灭”对应“1”),因此可增加一位标志位来实现接收端是否出

现相位差错,详细步骤请见文献[14]。

对于基于LED灯亮灭状态调制的接收端来说,仅需分析采集到含LED灯的小部分像素即可提取LED灯的亮灭状态信息,因此可利用LED阵列实现信号的并行发送和并行提取。同时还可根据LED灯的亮度灯等级进行多幅调制进一步提高系统的频谱效率。



$$f_{camera} = 30 \text{ fps}, f_{FH} = 25 \text{ kHz}, f_{space} = f_{mark} = 120 \text{ Hz}, \theta_{mark} = 0^\circ, \theta_{space} = 180^\circ$$

图4 UPSOOK波形

Fig. 4 An example of UPSOOK waveforms

2.2 基于图案明亮条纹的调制方式

除上述基于LED灯亮灭状态的调制方式外,还可以通过卷帘快门特性进行基于图案明亮条纹信息的调制方式。

由图3(b)可知,RS型的IS采用逐行曝光模式,因此可利用LED快速(频率高于 f_{max_eye} ,人眼观察不到闪烁)闪烁将“0, 1”比特信息以亮灭形式发送,在接收端通过卷帘快门将曝光时间 $t_{shutter}$ 内所接收到的信号依次在IS的不同行(列)像素区间内保存下来。

如图5所示,假设摄像机在拍摄一个被LED照亮的墙壁(或其他平面),当LED(图5(a)最左列)发光时,整个图像传感器表面被所反射的光照亮(如图5(a)中间列所示),此时IS

的第1行像素此时被曝光,因此记录下一条亮条纹。LED接下来短暂熄灭,而此时IS的第2行像素被激活,从而记录下来此时的暗条纹,这个步骤一直进行到IS的最后1行像素被曝光完毕,因此当这张曝光时长为 $t_{shutter}$ 的帧生成时,其中的明暗条纹即为 $t_{shutter}$ 时刻内IS所接收到的LED灯亮度变化,并且条纹宽窄与LED灯的亮灭时间长短成正比。因此可以用此特性从图片帧的亮暗条纹中得到 $t_{shutter}$ 时刻内LED所发送的信号波形。图5(b)为一张被绿色信号光照亮的墙面照片(分辨率 1920×1080),信号的频率为1.5 kHz,图中亮暗条纹宽窄均匀,图中右侧的白色曲线则为照片中每行像素的RGB累加的曲线图,此曲线图与LED所发送的信息一致。

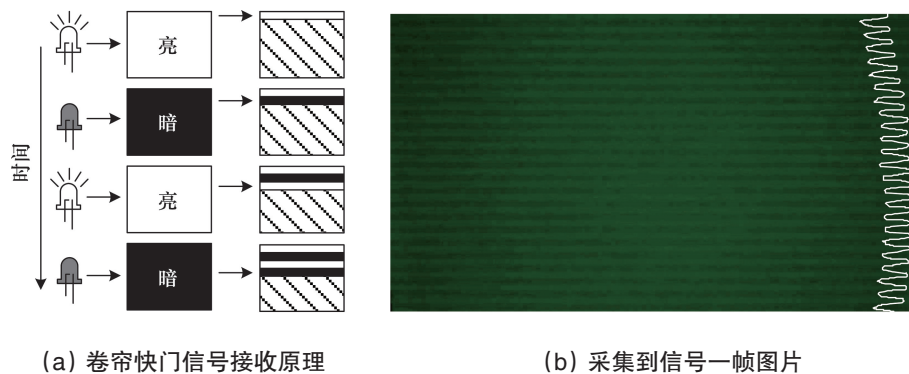


图5 基于图案明亮条纹的相机通信

Fig. 5 OCC using bright and dark stripes

由于摄像机每 t_{camera} 才曝光 t_{shutter} ($t_{\text{shutter}} < t_{\text{camera}}$), 因此接收端无法接收到两次曝光时间之间的 LED 信号, 从而导致造成信号丢失。虽然此方法可在在一帧图片中得到多个比特信息, 能显著提升系统通信速率, 但这种基于图案明亮条纹的方法需分析整个 IS 中的所有像素, 计算量大且对系统收发端距离有相应要求。为了解决信号丢失问题, 也需设计一种合适的同步机制实现信号的完整接收。

3 提高 OCC 通信速率的方式

由于普通相机的帧率较低, 为了实现更高速的 OCC 通信需使用更复杂的调制方式, 本章分别从空分复用、波分复用和高阶调制等方向给出了 3 种提高 OCC 系统速率的方式。

3.1 空分复用技术

由图 1 可知相机在作为 VLC 接收器时具备信号的空间分离能力, 因此可在发送端使用多个 LED 并行发送信号从而提高信号的频谱利用率。若 OCC 系统采用基于 LED 灯亮灭状态的调制方式进行通信, 由于此时接收端在接收信息时仅需对含有 LED 灯图案的小部分像素进行处理, 从而可有效利用整个 PD 阵列进行并行接收。图 6 为一个基于图像 MIMO 的 OCC 系统示意图。

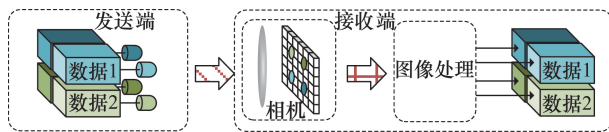


图 6 基于图像 MIMO 的 OCC 系统
Fig. 6 Illustration of OCC MIMO system

图像 MIMO 是视距传输 VLC 系统的一大优势^[5], 利用相机对光的空间分离能力可在信号接收时确保 IS 不同位置的像素点仅接收来自某一确定方向的信号, 从而实现信号的空分复用。如图 6 所示, 发送端采用了 4 路并行的 LED 发送信号, 这对相机来说具有不同的入射方向, 因此这 4 个 LED 灯被透镜聚焦后的影像会位于 IS 上的不同位置。对于传统基于 PD 的接收器来说该方案变为干扰为有效信号, 不仅能明显提高接收端信号的信噪比, 并且可实现信号的空分复用, 提高了 VLC 系统的频谱利用效率。

虽然对于基于 PD 的 VLC 系统也可使用成像镜头+PD 阵列来实现信号的空分复用技术, 但因 PD 阵列的像素点尺寸过大, 很难得到类似于相机的信号空间分离精度, 同时使用镜头的 PD 系统的移动性也不如 OCC 系统。

3.2 波分复用技术

因彩色 IS 的每个像素点前均已安装彩色滤光片, 因此整个彩色 IS 的接收器可视为具备 RGB 三色信号的三通道光接收装置(图 2)。若在发送端使用 RGB LED 组合出来的白光进行信号的并行发送, 在接收端则可分别通过 RGB 三个通道将发送信号采用波分复用的方式进行分离接收。图 7^[10]为利用彩色相机实现波分复用技术的示意。

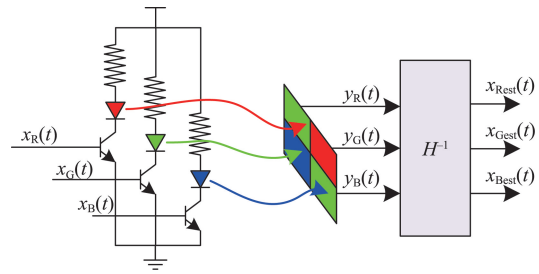


图 7 利用彩色相机实现波分复用技术
Fig. 7 Schematic diagram of the RGB filter-based WDM system

由图 7 可知, 发送端采用 RGB 三色 LED 进行信号的发送, 与基于空分复用的 OCC 系统不同的是, 基于 WDM 的 OCC 系统 LED 需采用 RGB LED, 因 RGB LED 的三色芯片被封装在一个 LED 内, 所以从接收端的角度来看, 这些 RGB LED 芯片的图案在空间无法分离, 因此会被同一区域的像素阵列接收。又由于相机 Bayer 滤光片具有很宽的光谱透过率, 若从 RGB 三路通道直接接收信号会使得信号在波长上有干扰, 例如当发送端仅适用绿光发送信号时, 如图 8^[16]所示, IS 的红色和蓝色通道同样有信号输出, 因此需要在接收到的三路并行信号之后采用信号颜色解复用技术。

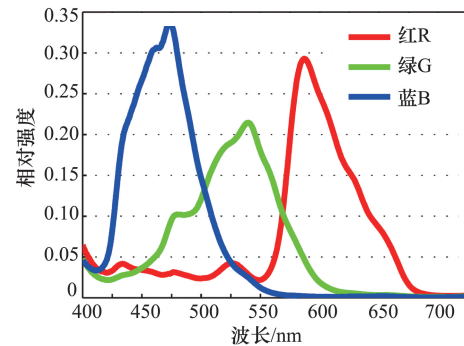


图 8 尼康 D5000 单反相机传感器的相对透过率曲线
Fig. 8 Relative intensity profiles for a Nikon D5000 DSLR optics and sensors

因 RGB 3 种颜色通过 RGB 3 种滤光片时具有不同的透过率(直流增益), 可将此特性当作 MIMO 信道矩阵 H 。因此从数学角度来说这种由滤光片不完美所引入的颜色串扰可视为 MIMO 解复用问题^[10]

$$H = \begin{bmatrix} h_{RR} & h_{RG} & h_{RB} \\ h_{GR} & h_{GG} & h_{GB} \\ h_{BR} & h_{BG} & h_{BB} \end{bmatrix} \quad (1)$$

需注意的是, 式(1)中的 h_{RG} 代表红色 R LED 经过绿色 G 滤光片的信道增益, 其他符号类似。

因此接收端所收到的信号可用式(2)描述

$$Y = HX + N \quad (2)$$

其中 X 和 Y 分别为发送和接收光功率信号矩阵, N 为噪声矩

阵,式(3)给出了这三者的详细表达式

$$\begin{cases} \mathbf{Y} = [y_R & y_G & y_B]^T \\ \mathbf{X} = [x_R & x_G & x_B]^T \\ \mathbf{N} = [n_R & n_G & n_B]^T \end{cases} \quad (3)$$

在得到信道矩阵 \mathbf{H} 的基础上,即可用式(4)进行信号的解复用,得到所恢复出来的发送信号 \mathbf{X}_{est} 。

$$\mathbf{X}_{est} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{Y} \quad (4)$$

由于不同滤光片对不同颜色的光具有不同的透过率,因此 \mathbf{H} 矩阵几乎是满秩矩阵,从而可使用最简单的解复用方式得到 \mathbf{X}_{est} 。

这种基于彩色相机的波分复用技术可进一步在空分复用的基础上提高信号的频谱效率,进而从一个新的维度提高 OCC 的通信速率。

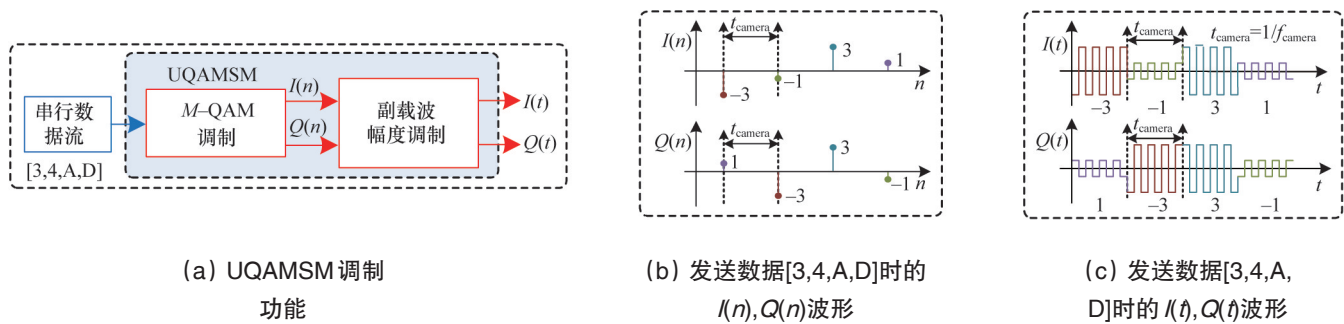


图9 UQAMSM系统及波形示意

Fig. 9 An example of UQAMSM system and waveforms

需要注意的是,该方案通过使用LED发送多亮度的符号来更有效的传输数据,由于摄像机通常会使用gamma函数对所采集的光信号进行非线性处理,因此接收端所接收到的LED亮度的差异随着LED亮度的不同而不同。为了提高系统可靠性,可在发送端信号发送前使用预失真技术或在接收端视频采集后使用后失真技术对信号进行非线性的补偿,从而实现误码性能的改善,详细处理请见文献[9]。

4 OCC应用场景

受视距传输和通信速率低等条件所限,OCC系统远不如RF系统灵活。但由于使用相机作为接收器的OCC系统具有一些独有的特性,例如信号的空间分离、波长分离以及卷帘快门接收等特性,使得该系统可支持一些特有的功能,例如空分复用、波分复用,可从图片或视频内提取数字信息等。目前基于LED的照明、车辆、指示、显示光源已广泛布置,再加上内置相机的智能终端的普及,OCC技术在智能交通、室内定位等领域具有独特的应用潜力。

4.1 室内定位

目前室内定位系统大都使用RF或者红外光来进行定位,使用可见光的OCC系统相比上述定位方案具有天然的高

3.3 高阶调制技术

在使用空分复用、波分复用等技术的基础上,OCC系统还可使用高阶调制技术来提高系统的频率利用率。得益于镜头+PD阵列接收模式,OCC系统通常拥有非常高的信噪比,文献[9]提出了一种名为欠采样QAM子载波调制(UQAMSM),该文献结合空分复用+高阶调制技术实现了1024-QAM信号的传输。

图9(a)为UQAMSM调制方式的发送端原理框图,可以看到左侧串行数据在经过M-QAM(M为调制阶数)调制后得到了实部 $I(n)$ 和虚部 $Q(n)$ 两个并行数据流,再通过副载波(方波载波)的幅度调制即可生成两路无闪烁的已调信号 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 。最终使用两个白光LED即可将 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 发射给相机,接收端再通过基于LED亮度的解调方式进行信号还原。

密度覆盖、无射频辐射、绿色环保等优点。OCC可使用室内的照明灯具作为定位信息或位置ID的发射源,再利用智能手机内置摄像头将所接收到的每盏灯的位置ID提取出来,从而可计算出终端所在的大概位置。

图10(a)给出了室内LED灯在天花板的常见矩形布局,图10(b)则为图(a)的最小组成单元,该最小单元由在矩形四角的4盏LED灯(Tx_1-Tx_4)和一个探测器构成。由图10^[17]可知,当接收端Rx垂直向上捕捉影像时,有很大几率会同时收到多盏灯的影像,但因摄像头的FOV所限,有时仅能接收到1盏灯的影像,而有时甚至捕捉不到任何LED灯的影像。当摄像头仅捕捉到1盏灯的信号时,通过对该LED灯所发射的位置ID信号进行后台查询即可得到该摄像头所捕捉到的LED灯的精确位置,从而推测该摄像头所在的大概位置。若相机同时收了多个LED灯(图10(c)),利用到达角度法可得到更加精确的位置信息^[18]。

4.2 车联网

ITS可保障马路安全,控制车流量,通过对交通行为的监控提高马路效率、改善环境、节约能源,进而改善人们的生活^[19]。基于RF的专用短程通信技术(DSRC)可实现在高速移动下“车-车”、“车-路”的双向通信,为ITS提供了重要支

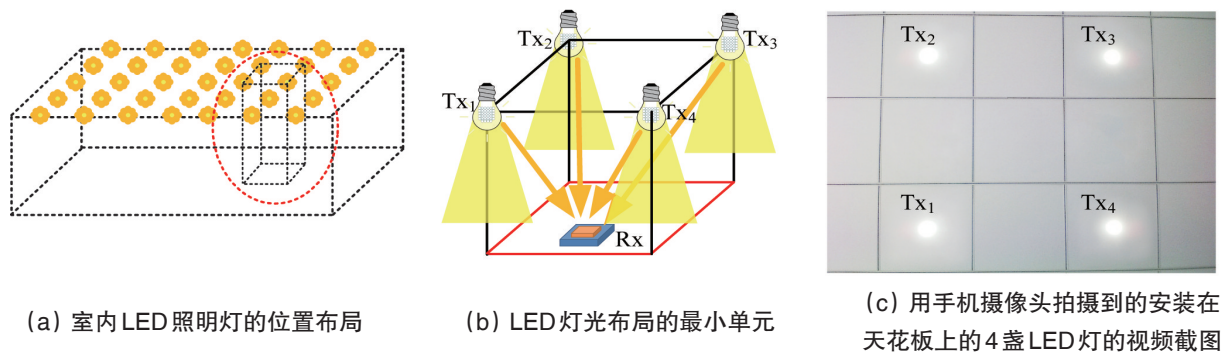


图 10 基于 OCC 的室内定位系统

Fig. 10 An indoor positioning system using OCC

持^[20]。DSRC 目前采用 RF 进行信号传输,由于 RF 的全向特性,基于 RF 的无线通信技术可有效实现车联网中信息的交互过程。除了基于 RF 的通信技术外,ITS 系统也可使用可见光实现无线通信。当今已有很多车辆使用基于 LED 的汽车前灯和尾灯,并安装有用来记录行车影像的行车记录仪,这为基于 OCC 的车联网通信技术提供了优质的硬件平台(图 11)。



图 11 利用 OCC 进行信息交互的车灯通信

Fig. 11 The scenario of V2V communication system using OCC

在车联网应用场景中,OCC 相比较与基于 RF 的 DSRC 具有以下优点:1) 因 LED 灯已广泛应用于路灯、交通信号灯、车灯,同时车辆、马路旁也安装有摄像头,所以可使用已安装的硬件设备实现 OCC,而无需额外安装用于 RF 通信的收发模块。2) 基于 OCC 的系统采用视距传输的 VLC 技术进行信号传输。由于光的直线传播特性,OCC 可提供很精确的定位服务,文献[17]表明目前基于 VLC 的室内定位方案已可实现 cm 量级的定位误差,普遍高于基于 RF 的定位技术。3) 高可伸缩性及低干扰性^[21],在车流量大、堵车等车辆密度高的场景下,RF 系统会由于不可避免的信号干扰等出现信号延时加剧等问题^[22]。基于 OCC 的通信系统仅接收附近车辆的灯光信息,再加上 OCC 可实现信号的空间分离,因此可大幅降低信号拥挤及干扰问题。

虽然与基于 RF 的 DSRC 系统相比,目前使用低帧率的 OCC 系统通信速率较低,但该技术所提供的几百 bps 的通信速率已足够支持“车-车”、“车-路”间紧急消息的传输^[23]。若需更高的通信速率,也使用高速摄像机作为接收器,文献[24]已实现使用高速相机完成 10 Mbit/s 的 OCC 在线通信实验。

4.3 其他应用场景

其他 OCC 的应用场景包括且不局限于:LED 屏幕真实(虚拟)广告、增强现实等,在 LED 发光的同时把相关的广告或者希望用户接收的数据信息发送给智能设备,从而可得到优惠广告或虚拟信息进而提高人们的生活、娱乐水平。

5 结论

可见光通信结合了射频无线通信的灵活性及光通信的高速特性,具有广泛的应用前景,而使用相机作为接收器的可见光通信技术因无需对目前已有智能终端进行升级改造,很容易被用户接收并使用。但由于智能终端的内置相机帧率较低,信号若以相机帧率的速率等级发送出去,人眼可观察到信号闪烁,不适用于照明+通信应用。本研究针对低帧率相机的 OCC 系统,介绍了几种无闪烁调制方式,从而满足了在无闪烁照明情况下的信号传输功能。为了进一步提高通信速率,本文分别从信号的空间、波长、幅值等维度,介绍了多种提高通信速率的技术,进而提高了 OCC 系统的实用性。同时还给出了几种适合 OCC 技术的应用场景,对 OCC 技术的实用化进行了讨论。

OCC 技术是一种新型的可见光通信技术,虽然目前 OCC 技术还有一系列未攻克的技术难题,但由于 OCC 技术相比传统基于 PD 的 VLC 技术具有自身优势,该技术还是有明显的应用优势及特殊应用场景。

参考文献(References)

- [1] Jovicic A, Li J, Richardson T. Visible light communication: Opportunities, challenges and the path to market[J]. Communications Magazine, IEEE, 2013, 51(12): 26-32.
- [2] Grobe L, Paraskevopoulos A, Hilt J, et al. High-speed visible light communication systems[J]. Communications Magazine, IEEE, 2013, 51(12): 60-66.
- [3] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications: System and channel modelling with Matlab[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012: 35-75.
- [4] Thorlabs. CCD and CMOS cameras operation manual and SDK[EB/OL]. [2016-05-03]. https://www.thorlabschina.cn/_sd.cfm?path=ITN&filename

- =ITN000563-D02.pdf&partnumber=DCC1645C.
- [5] Permalink. Field of View (FOV) of cameras in iOS devices[EB/OL]. 2013-02-22[2016-05-03]. <https://www.boinx.com/chronicles/2013/3/22/field-of-view-fov-of-cameras-in-ios-devices>.
- [6] Roberts R D. Undersampled frequency shift ON-OFF keying (UFSOOK) for camera communications (CamCom)[C]//Proceedings of the Wireless and Optical Communication Conference (WOCC). Chongqing: IEEE, 2013: 645-648.
- [7] Yang Z, Wang Z, Zhang J, et al. Wearables can afford: Light-weight indoor positioning with visible light[C]//Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. Florence: ACM, 2015: 317-330.
- [8] Danakis C, Afgani M, Povey G, et al. Using a CMOS camera sensor for visible light communication[C]//Proceedings of the Globecom Workshops (GC Wkshps). Anaheim: IEEE, 2012: 1244-1248.
- [9] Luo P, Zhang M, Ghassemlooy Z, et al. Experimental demonstration of a 1024-QAM optical camera communication system[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2016, 28(2): 139-142.
- [10] Luo P, Zhang M, Ghassemlooy Z, et al. Experimental demonstration of RGB LED-based optical camera communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1-12.
- [11] Hu P, Pathak P H, Feng X, et al. ColorBars: Increasing data rate of LED-to-camera communication using color shift keying[C]//The 11th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies. Heidelberg: ACM, 2015: 1-12.
- [12] Schöberl M, Brückner A. Photometric limits for digital camera systems [J]. Journal of Electronic Imaging, 2012, 21(21): 020501-3.
- [13] Canon. The Canon EOS-1Ds MARK II: The absolute pinnacle of D-SLR design and performance[EB/OL].[2016-05-03]. http://cpn.canon-europe.com/files/news/pro_lineup/EOS-1Ds-MkII-Whitepaper.pdf.
- [14] Luo P, Ghassemlooy Z, Minh H L, et al. Undersampled phase shift ON-OFF keying for camera communication[C]//Proceedings of the Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Hefei: IEEE, 2014: 1-6.
- [15] Roberts R D. A MIMO protocol for camera communications (CamCom) using undersampled frequency shift ON-OFF keying (UFSOOK)[C]//Proceedings of the Globecom Workshops (GC Wkshps). Atlanta: IEEE, 2013: 1052-1057.
- [16] Bongiorno D L, Bryson M, Dansereau D G, et al. Spectral characterization of COTS RGB cameras using a linear variable edge filter[C]//Proceedings of the IS&T. Burlingame: SPIE, 2013: 86600N-86600N-10.
- [17] Luo P, Ghassemlooy Z, Hoa Le M, et al. Experimental demonstration of an indoor visible light communication positioning system using dual-tone multi-frequency technique[C]//Proceedings of the Optical Wireless Communications (IWOW). Funchal, Portugal: IEEE, 2014: 55-59.
- [18] Armstrong J, Sekercioglu Y A, Neild A. Visible light positioning: A roadmap for international standardization[J]. Communications Magazine, IEEE, 2013, 51(12): 68-73.
- [19] Papadimitratos P, La Fortelle A, Evenssen K, et al. Vehicular communication systems: Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation[J]. Communications Magazine, IEEE, 2009, 47(11): 84-95.
- [20] Bai F, Stancil D D, Krishnan H. Toward understanding characteristics of dedicated short range communications (DSRC) from a perspective of vehicular network engineers[C]//Proceedings of the the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Chicago: ACM, 2010: 329-340.
- [21] You S H, Chang S H, Lin H M, et al. Visible light communications for scooter safety[C]//Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. Taipei: ACM, 2013: 509-510.
- [22] Agarwal A, Little T D C. Role of directional wireless communication in vehicular networks[C]//Proceedings of the intelligent vehicles symposium. San Diego: IEEE, 2010: 688-693.
- [23] Ji P, Tsai H M, Wang C, et al. Vehicular visible light communications with LED taillight and rolling shutter camera[C]//Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Seoul: IEEE, 2014: 1-6.
- [24] Yamazato T, Takai I, Okada H, et al. Image-sensor-based visible light communication for automotive applications[J]. Communications Magazine, IEEE, 2014, 52(7): 88-97.

Camera-based visible light communications

ZHANG Min¹, LUO Pengfei², FENG Shulan², ZHANG Philipp³

1. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China
2. Research Department of HiSilicon, HiSilicon Technologies Co.(Beijing), Ltd., Beijing 100085, China
3. Research Department of HiSilicon, HiSilicon Technologies Co.(USA), Ltd., Plano, Texas 75075, USA

Abstract Visible light communication (VLC) technology, which provides green lighting and data communication functions, is one of the most vibrant research topics in optical wireless communications. Since the popularity of smartphones, imaging sensor-based VLC (or optical camera communication, OCC) is receiving more and more attention and investigation. Such OCC technology has the ability to separate light signals coming from the different angles of incidence, thus shows an extensive application prospect in many areas. The OCC has lots of differences from the traditional single photodiode-based VLC system, not only in signal processing filed but also in modulation and other domains. Therefore, we have to develop dedicated techniques to support the OCC. This paper reviews some key techniques in OCC system, and discusses the application scenarios of this system.

Keywords visible light communication; imaging sensor; undersampling; application scenarios

(编辑 傅雪)