

高速可见光通信中关键使能技术研究

李荣玲 商慧亮 雷雨 王一光 王源泉 陆肖元 迟楠

(复旦大学通信科学与工程系 专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433)

摘要 LED替代白炽灯和日光灯用于照明已经成为明显的趋势。LED可以同时用于照明与通信的特点,使得可见光通信(VLC)成为了近年来研究的热点。随着计算机和智能设备的迅速普及,接入网的速率和覆盖面需要进一步提高,VLC技术有望成为突破瓶颈的高速数据传输技术。VLC技术发展的主要挑战在于白光LED有限的调制带宽,研究者们已经提出了多种技术,如均衡技术、蓝光过滤、高阶调制格式、离散多音调调制、波分复用技术和多输入多输出(MIMO)技术等,以扩展调制带宽、提高传输速率。对这些技术的原理和性能进行了分析与讨论,以期未来的研究提供一些参考。

关键词 光通信;可见光通信;白光LED;蓝光过滤;均衡技术;离散多音频调制;多输入多输出技术;波分复用技术
中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.050003

Research of Key Enabling Technologies for High-Speed Visible-Light Communication

Li Rongling Shang Huiliang Lei Yu Wang Yiguang Wang Yuanquan
Lu Xiaoyuan Chi Nan

(State Key Laboratory of Application Specific Integrated Circuit and System,

Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract LED replacing fluorescent and incandescent lamps for lighting has become an obvious trend. The feature that LED can be used for both illumination and communications makes visible-light communication (VLC) become a hot point in recent years. With the rapid popularization of computers and smart devices, the bandwidth and coverage of access networks need further improvement. VLC technology is a promising communication technology for high speed data transmission to break through the bottlenecks. A main challenge of this technology is the limited modulation bandwidth of white LED. Researchers have proposed a variety of techniques, such as equalization technology, blue filtering, high-order modulation formats, discrete multi-tone (DMT) modulation, wavelength division multiplexing (WDM) technology, and multiple-input multiple-output (MIMO) technology, to extend bandwidth and increase transmission speed. The principles and performances of those techniques are analyzed and discussed to provide a reference for future researches.

Key words optical communications; visible-light communication; white LED; blue filtering; equalization technology; discrete multi-tone modulation; multiple-input multiple-output; wavelength division multiplexing

OCIS codes 060.2330; 060.2605; 060.4080; 060.4230

1 引言

白光LED现在已经被广泛应用于信号发射、显示和照明等领域。与其他光源相比,白光LED具有更高的调制带宽。并且白光LED还具有调制性能好、响应灵敏度高的优点,利用LED的这些特性,我们可以将信号调制到LED所发出的可见光上进行传输。白光LED可以将照明与数据传输结合起来的特性,促进了一种新型的无线通信技术,即可见光通信(VLC)技术的发展。当今无线频谱资源紧张,很多频段都已经被占用,VLC利用的可见光波段尚属空白频谱,无需授权即可使用,因此VLC技术有效地利用资源,拓展了

收稿日期: 2012-11-23; **收到修改稿日期**: 2013-02-23; **网络出版日期**: 2013-05-06

基金项目: 国家973计划(2010CB328300)、国家自然科学基金(61107064, 61177071)、国家863计划(2011AA010302, 2012AA011302)、国家科技支撑计划(2012BAH18B00)和上海市科委科技创新行动计划(12dz1143000)资助课题。

作者简介: 李荣玲(1990—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: sophielinda2@gmail.com

导师简介: 迟楠(1974—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信系统方面的研究。E-mail: nanchi@fudan.edu.cn

一代宽带通信的频谱,可以解决光通信与无线通信网络共存与兼容的问题。并且与其他无线技术相比,VLC还拥有众多优点^[1~3]:1)由于白光对人眼的安全性,室内白光LED灯的功率之和可以高达10W以上,这就使可见光通信具备了非常高的信噪比,为其高速通信打下了良好的基础;2)由于室内表面对光的漫反射,即使在有遮挡的地方,也可以进行高速率的通信;3)由于白光不可穿透墙壁,甚至窗帘,因此可见光通信具有高度的保密性;4)由于白光和射频信号不相互干扰,所以它可以应用在电磁敏感环境中,如机舱、医院等;5)由于频谱无需授权即可使用,所以可见光通信应用灵活,可以单独使用,也可以作为射频无线设备的有效备份。

由于VLC技术的许多优点,加上LED技术的发展,以及对适用于各种场景的接入技术的需求,近年来,研究者们对VLC给予了越来越多的关注^[1~11]。日本、美国以及欧盟国家的许多知名研究机构已经开展了许多关于VLC技术的研究^[4,5],进一步深入的研究正在进行中,并且得到了政府的大力支持。VLC技术在短短10年间迅猛发展,从几十兆比特每秒(Mb/s)^[6,7]到500 Mb/s^[8]再到800 Mb/s^[9],传输速率不断提升,现在已经突破吉比特每秒(Gb/s)^[10,11],更高速率的通信也已近在眼前;从离线到实时,从低阶调制到高阶调制,从点对点到多输入多输出(MIMO),技术上一日千里,甚至已经走向市场。显而易见,VLC技术已经成为当前研究的热点。

然而,VLC技术的发展也存在着一些限制因素,其中最主要的挑战在于白光LED有限的带宽^[12,13],从而限制了传输速率。研究者已经提出了多种技术以扩展调制带宽,提高传输比特率,如高阶调制格式^[14]、蓝光过滤^[12]、预均衡技术^[6,7]、后均衡技术^[15]、离散多音调制(DMT)^[8,10,16,17]、波分复用(WDM)^[18~20]以及光MIMO技术^[16,21~25]。使用这些技术中的某种技术,或者几种技术相结合,可以大大提高VLC系统的传输速率。目前,国外的主流设备商和各大学、研究所等都在开展VLC技术的研究^[4~11,15~18,26],其中的翘楚当属美国、日本与欧盟国家。

VLC技术的研究首先在日本开展。早在2000年,日本研究者就提出并仿真了利用LED照明灯作为通信基站进行信息无线传输的室内通信系统^[4]。2009年,中川实验室提出了一种基于载波监听多路访问/冲突检测(CSMA/CD)的全双工多址接入的可见光通信系统,实现了100 Mb/s的高速通信^[26]。日本关于VLC技术的研究已经走出了实验室,发展到了应用阶段。

美国和欧盟国家虽然关于VLC技术的研究起步比日本晚,但由于政府的重视,研究资金充裕,现已取得了许多优异的成绩。他们分别开展了一系列的政府支撑项目支持VLC技术的研究,如OMEGA项目、“智能照明通信”(SLC)项目以及“超并行可见光通信”(UP-VLC)项目等,促使VLC技术迅猛发展,传输速率一再提高,每年都有新的突破。2008年,通过采用蓝光过滤与预均衡技术,提高LED的调制带宽,英国科学家将VLC系统的传输速率从10 Mb/s提高到了80 Mb/s[非归零码键控(NRZ-OOK)]^[7]。2009年,牛津大学通过与韩国三星公司合作,进行了一些VLC实验,采用后均衡技术实现了100 Mb/s(NRZ-OOK)的传输速率^[15]。2010年,英国科学家报道了一个采用MIMO技术的VLC系统实验,该实验实现了220 Mb/s的传输速率^[16]。同年,德国西门子子公司利用DMT技术与高阶调制格式[正交幅度调制(QAM)],实现了513 Mb/s的VLC系统传输^[8]。2011年,利用WDM与DMT技术,采用红绿蓝(RGB)三色LED的发射机,德国科学家实现了803 Mb/s的传输速率^[18]。2012年,意大利的圣安娜高等研究院采用1024QAM和DMT技术,以雪崩光电二极管(APD)作为接收机,实现了1 Gb/s的VLC传输^[10]。

国内目前关于VLC技术的研究还比较少,已经明显落后于国际水平。北京邮电大学、南京邮电大学、复旦大学、东南大学和中国科学院半导体研究所等都在开展相关研究,现处于摸索起步阶段^[27~31]。

本文将简要讲述VLC系统的构架原理,然后分析几种提高系统传输速率的方案原理,并对其性能进行研究,以为VLC技术未来的研究提供参考。

2 提高VLC系统传输速率的方案

限制VLC系统传输速率提高的主要原因在于白光LED有限的调制带宽,目前最广泛使用的荧光粉LED的调制带宽只有几兆赫兹^[16],因此如何提高LED的调制带宽从而提高系统传输速率成为了研究者们研究的关键点。首先,研究者在信号探测之前,加入了一块蓝光滤波器,以滤除响应慢的黄光分量,从而将荧光粉LED的调制带宽从3 MHz提高到了10 MHz^[1];然后,采用均衡技术,调整LED的频率响应,将带宽

提高了到几十兆赫兹^[6,7,15,32]。使用 RGB-LED 替换荧光粉 LED 作为光源,可以获得更高的调制带宽,通过采用 WDM 技术,可以提高系统传输速率^[9,18,19,33];采用 MIMO 技术,通过空分复用可以提高系统传输速率^[16,21~23];通过采用高阶调制格式、DMT 技术,可以进一步提高系统传输速率^[8~10,16~18]。下面首先介绍 VLC 系统的基本构架,然后详细讲述几种提高 VLC 系统传输速率的方案原理,这些方案可能只采用了上述技术中的一种,也可能是几种技术的结合。

2.1 VLC 系统构架

图 1 为一个基于白光 LED 的可见光通信系统框图,该系统包括完整的发射、信道传输和接收部分。原始的二进制比特流经过预处理和编码调制之后,驱动 LED,对 LED 进行强度调制,将电信号转换为光信号。预处理,即预均衡,是为了补偿器件、信道对信号带来的失真,通过采用预均衡技术可以提高 LED 的响应带宽,提高传输速率。而在接收端进行的后均衡,可以补偿其他信道损耗,如相位噪声等。预均衡与后均衡技术将在随后详细介绍。编码调制是为了在有限的带宽上实现更高的传输速率。由于受到可见光通信带宽的限制,为了提高白光 LED 通信系统的传输速率,在发射端可以通过设计和采用高阶的调制编码技术来提高传输的频谱效率,从而实现高速传输。目前研究者们采用最多的高阶调制格式为 QAM 正交频分复用 (OFDM)。VLC 系统中使用的光源白光 LED,目前市面上一共有两种类型:荧光粉 LED 与 RGB-LED。荧光粉 LED 是使用最为广泛的 LED 类型,其原理是利用蓝光激发黄色荧光粉,以产生白光。这种类型的 LED 结构简单,成本较低,调制复杂度相对较低,但是调制带宽很低,对室内环境的频谱利用率不高。由于荧光粉 LED 的调制带宽只有几兆赫兹^[21],系统的传输速率被限制,当信号格式采用 NRZ-OOK 时,传输速率最高只能达到 10 Mb/s^[13]。这是由于黄色荧光粉的响应速度慢而造成的。另一种类型为 RGB-LED,其原理是将红、绿、蓝三色 LED 芯片封装在一起,将它们发出的光混合在一起得到白光。RGB-LED 具有很高的调制带宽,非常有希望用于未来的高速信号传输,但是其调制复杂度相对较高,并且如何控制三个芯片以保持颜色稳定、避免闪烁还有待进一步研究。基于两种类型的 LED 的 VLC 系统,各有其优势。基于荧光粉 LED 的系统优势在于实现简单、成本低廉;而基于 RGB-LED 的系统优势在于可以实现更高的传输速率。

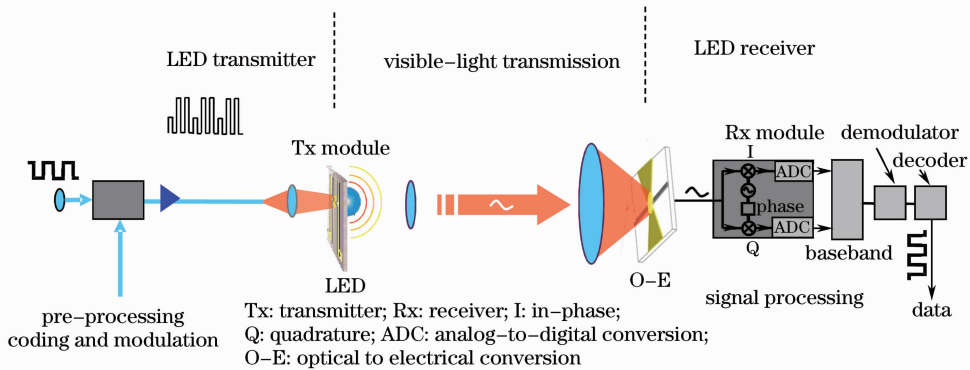


图 1 白光 LED 可见光通信系统框图

Fig. 1 Block diagram of visible-light communication system using white LED

承载着传输数据的光信号在自由空间中进行传输,通过接收机前端的透镜,聚焦到光电探测器上。在此系统中,接收到的绝大部分能量来自于直射路径 (LOS)。光电探测器将接收到的光信号转换为电信号,对信号进行信号处理、解调制和解码等过程之后,恢复出原始的发送信号。VLC 系统可以采用的接收机类型有三种:基于 PIN 二极管的接收机、基于 APD 的接收机和基于图像传感器的接收机。基于 PIN 的接收机响应快,灵敏度高,价格低廉,基于 APD 的接收机响应更快,灵敏度更高,具有更高的信噪比,但价格相对较高,因此目前的高速 VLC 系统通常采用基于 PIN 或者 APD 的接收机。而基于图像传感器的接收机响应速度较慢,灵敏度相对较低,但是它可以同时接收来自多个光源发送的数据,并且传输距离更长,因此在 MIMO-VLC 系统中经常使用,同时在很多应用实例中,如智能交通系统、定位等,使用较多。

2.2 均衡技术

由于荧光粉 LED 的调制带宽很小,限制了 VLC 系统的传输速率,所以研究者们首先想到的是提高调制

带宽,从而提高传输速率。蓝光过滤和均衡技术被首先提出,有效地扩展了调制带宽。蓝光过滤的原理非常简单,仅仅是在接收机的前端加一块蓝色滤光片,使接收机只探测蓝光部分。均衡技术就是通过利用电容和电阻串并联来调节 LED 的频率响应,根据均衡位置的不同,分为预均衡技术和后均衡技术。

2.2.1 预均衡技术

采用预均衡技术的 VLC 系统已经有许多报道^[6,7,12,32]。采用预均衡技术,荧光粉 LED 的调制带宽可以扩展到 25 MHz,已经实现高达 40 Mb/s 的传输速率^[6,32]。将蓝光过滤与多谐振预均衡技术相结合,可以进一步提高调制带宽到 45 MHz,从而采用 NRZ-OOK 就可以实现 80 Mb/s 的传输速率。此 VLC 系统的实验框图如图 2 所示^[7]。

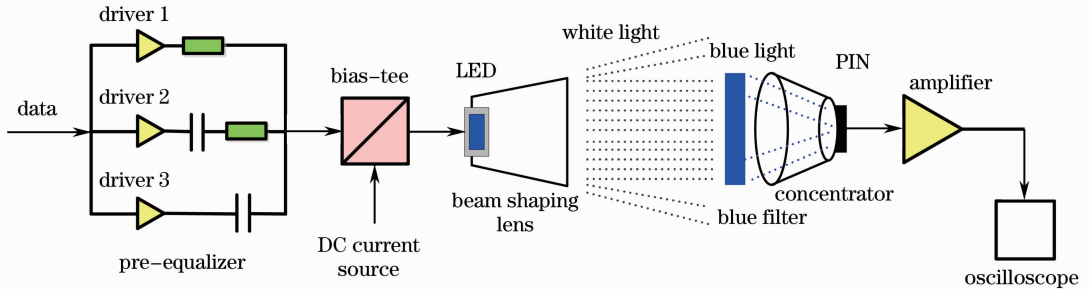


图 2 采用预均衡技术的 VLC 系统实验框图

Fig. 2 Experiment configuration of VLC system using pre-equalization

此系统采用商用的荧光粉 LED 作为 VLC 发射机。LED 由直流(DC)电源驱动,以获得要求的亮度。原始的数据信号经过驱动器 1~3(BUFF634T)预均衡之后,再通过偏置器(Bias-tee)与直流信号合为一路信号。直流电流需要合适设置,以在保证照明条件的同时,确保器件工作在线性区域。VLC 接收机由一个蓝光滤波器、一个聚焦透镜、一个光电探测器(PIN 型)和低噪放大器组成。

从文献[9]可以知道,由 LED 和驱动电路引入的串联电感为 330 nH,LED 的内部电阻为 0.9 Ω 。谐振驱动技术在谐振频率 $f = 1/2\pi \sqrt{LC}$ (L 和 C 分别为电感和电容)点上可以消除电感的影响,从而最大化驱动电流。预均衡器利用 3 个并行的驱动器来均衡蓝光分量的频率响应。驱动器 1~3 分别均衡蓝光的低频、中频和高频范围的频率响应。均衡后的带宽由高频段的谐振频率而定,即 $f_2 = 1/2\pi \sqrt{LC_2}$,由驱动器 3 中的 C_2 决定。在由 C_1 定义的中频段,驱动器 2 中包含了一个附加的电阻 R_2 来减少流向 LED 的电流,平坦中频段的频率响应。低频段的频率响应对应中高频段的频率响应,通过调节 R_1 来限制驱动器 1 的驱动电流,以实现均衡。

采用均衡之后,荧光粉 LED 的带宽扩展到了 45 MHz。在此带宽之上,研究者采用 NRZ-OOK 实现了 80 Mb/s 的数据传输,并且误码率(BER) $R_{BE} < 10^{-6}$ 。

2.2.2 后均衡技术

在发射端进行均衡称为预均衡,均衡同样可以在接收端实现,即为后均衡。利用后均衡技术,通过探测荧光粉 LED 的蓝光分量,已经实现 100 Mb/s (NRZ-OOK)的传输速率^[15]。

图 3 给出了后均衡 VLC 系统的框图。VLC 发射机为一个商用荧光粉 LED,通过 Bias-tee 由数据信号和直流源驱动。加载在 LED 上的直流偏置使其工作在线性区域,同时保证足够的照明亮度。在接收端,携带着传输信息的光信号经过蓝光滤波器滤除黄光分量之后,通过聚焦透镜聚焦到 PIN 上,PIN 将光信号转换为电信号。电信号经过放大器放大之后,输入到一阶均衡器中进行均衡。

均衡器由电容和电阻并联而成。均衡器的频率响应可以表示为

$$H_c(\omega) = \frac{1}{k} \times \frac{1 + j\omega T}{1 + j\omega T/k}, \quad (1)$$

式中 $1/k = R_L/(R + R_L)$, $T = RC$, R_L 是负载电阻。均衡器响应的幅值为

$$|H_c(\omega)| = \frac{1}{k} \times \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T^2}{1 + \omega^2 (T/k)^2}}. \quad (2)$$

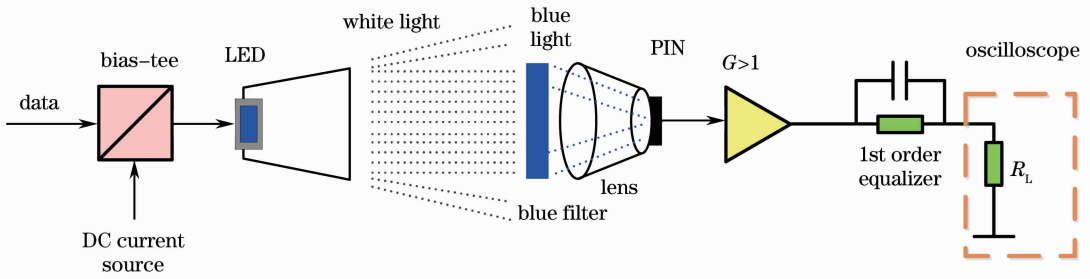


图3 采用后均衡技术的 VLC 系统

Fig. 3 VLC system with post-equalization

注意, $1/k$ 是均衡器的直流系数 ($\omega=0$)。此均衡器的 3 dB 点计算结果为

$$\omega_{3\text{ dB}} = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{1}{1-2/k^2}}, \quad (3)$$

当 $k > \sqrt{2}$ 时, 此 3 dB 点存在。在此 3 dB 点附近, $|H_e(\omega)|$ 近似为线性。均衡器频率响应的斜率 s_e 可以近似表示为

$$s_e = \frac{6\pi T}{\sqrt{\frac{1}{1-2/k^2}}}. \quad (4)$$

为了使蓝光分量高频段和低频段的增益平衡, 均衡器的响应要求 $s_e = -s_b$, s_b 为未加均衡时蓝光分量的频率响应曲线斜率, 近似为 -0.24 dB/MHz。采用均衡而获得的期望带宽可以近似估计为

$$W_{\max} \leq \frac{20 \lg k}{-s_b}. \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可以看出, T 和 k 的选择将会决定均衡带宽以及均衡信号的增益。选择一个较大的 k 值, 将会获得更高的调制带宽。然而, k 值被接收机的输入动态范围 ΔP 所限制, 而 ΔP 由接收机饱和功率(最大允许功率)和接收机灵敏度(最小要求功率)之差决定。

采用上述后均衡方法, 研究者对系统带宽进行了测量, VLC 系统的调制带宽扩展到了 50 MHz。在此带宽之上, 采用 NRZ-OOK 实现了 100 Mb/s 的传输速率, 并且 $R_{\text{BE}} < 10^{-9}$ 。

2.3 离散多音频调制 (DMT)

DMT 也称为 OFDM, 应用在 VLC 系统中, 是为了减小多径衰落效应, 抵抗符号间干扰 (ISI), 以高频谱效率支持高速率数据传输。通过采用均衡技术与蓝光过滤, VLC 系统的传输速率已经达到了 100 Mb/s (NRZ-OOK)^[11]。为了进一步提高比特率, 研究者们考虑在 VLC 系统中应用高频谱效率的调制技术如 DMT, 已经开展了许多研究^[17~19]。目前, 以 PIN 为接收机, 荧光粉 LED 为光源的 VLC 系统, 采用 DMT 技术, 最高速率可以达到 230 Mb/s^[19], 如果采用 APD 为接收机, 速率可以进一步提高到 1 Gb/s^[10]。

DMT 调制方案的关键之处在于将一个单载波信号分解为平坦的多个子载波。子载波之间有最小的频率间隔, 以保证其时域波形之间的正交性, 信号频谱就对应于各个子载波之间的频率重叠。如果信道响应信息在发射端已知, DMT 信号可以灵活地匹配信道。在实际中, 信道匹配是通过自适应的位加载技术实现的, 最优化了在不同的子载波上传输的不同大小的信号星座。类似地, 子载波上的信号功率分布也可以加以调整以获得相近的 BER 性能, 这使得信道容量可以被有效地利用。

图 4 给出了 DMT 实现的原理图。一路高速的二进制序列通过串并转换被分为 N 路并行的低速率的二进制比特流。对于每一路比特流, 进行 QAM 映射, 将二进制数据映射 QAM 星座的一个符号。映射后的数据为复数形式。DMT 发射机中快速傅里叶逆变换 (IFFT) 的应用是为了高效地将 QAM 符号调制到相互正交的 N 个子载波上。为了获得实信号, 选择 $2N$ 的信息符号以满足厄米对称性 (镜像)。镜像之后, 通过补零来引入 2 倍的过采样, 产生 $4N$ 个子载波。 $4N$ 点 IFFT 的结果实际上是一个实值的时间信号, 称为 DMT 帧。为了减少 ISI 的影响, 每一块 $4N$ IFFT 点都要加上一个长度为 N_{cp} 的循环前缀 (CP)。加循环前缀之后, ISI 的影响可以减小。 $(4N + N_{\text{cp}})$ -点的序列对应于多载波 DMT 时间信号的离散时间抽样值, 通过

IFFT 输出端的并串转换得到。此时域信号输入到数模转换器(DAC)中。

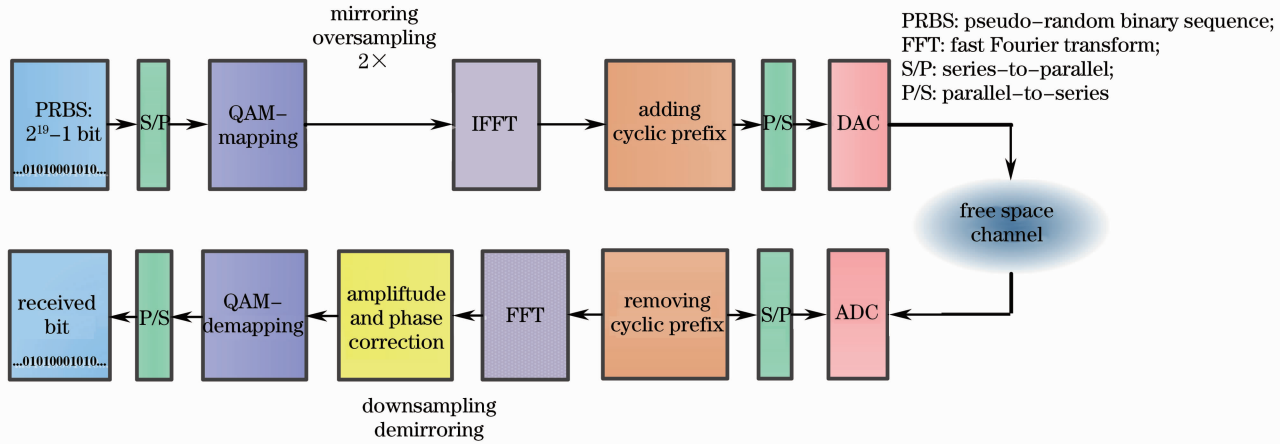


图 4 DMT 实现的原理框图

Fig. 4 Block diagram of DMT implementation

在接收端,接收信号经过串并转换和 CP 移除之后,输入到快速傅里叶变换(FFT)模块中进行处理。理想情况下,FFT 的输出应为在发射端发送到 IFFT 模块的原始符号。一般而言,附加的信道损伤必须加以估计,并做适当处理。纠错之后,QAM 符号解映射,经过并串转换就得到了恢复信号的比特流。

2.4 光 MIMO 技术

由于 LED 有限的调制带宽,VLC 实现高速传输速率面临着很大的挑战。然而,由于白光 LED 同时用于照明,可以有很高的亮度,这就保证了很高的信噪比(SNR)。可以同时获得多条高 SNR 低带宽的信道,这使得 MIMO 技术成为实现高速传输速率的一个极佳的选择。

现在已经有许多关于光 MIMO 的研究^[34~36],利用 MIMO 技术来实现光源和探测器之间的互连的实验也已经有报道^[37]。然而这些自由空间光互连的例子都要求光源与某个特定的探测器或者一组探测器之间的精确对准,准直是通过设计物理系统而实现的。当接收机具有移动性时,物理准直很难实现。MIMO 技术允许互连要求的准直在电子部分实现,从光源发出的光没有必要精确地击中探测器。MIMO 技术可以通过学习信道矩阵,从而定量信道间的串扰,用于估计传输数据。因此,采用 MIMO 技术不仅可以增加系统容量,还可以通过采用电信号处理的方式,降低实现物理准直的难度。采用 MIMO 技术的 VLC 系统分为两种类型,一种是非成像 MIMO-VLC 系统,每个接收端有独立的探测器,另一种是成像 MIMO-VLC 系统,采用成像探测器作为接收机。MIMO-VLC 系统的数学建模比较复杂,在此只简单介绍系统原理,具体深入的研究还需参考专业文献。

2.4.1 非成像 MIMO-VLC 系统

非成像 MIMO-VLC 系统的原理框图如图 5 所示^[21]。系统输入是一串二进制比特流,经过串并转换成为一组并行的数据流,再经过编码之后,输入到 N_t 台发射机中。发射机由一组荧光粉 LED 阵列组成。信号对 LED 发出的光进行调制,电信号转换为光信号。光信号经过信道传输之后,通过接收机前端的透镜,聚焦到探测器上。光从每台 LED 阵列发射机传播到接收机,一般有两种类型的传播。每一台发射机都有一个直射分量传播到接收机,同时有一个散射分量通过表面反射之后传播到接收机。散射分量相较于直射分量很小,所以一般忽略。每台探测器接收到的信号都是 N_t 台发射机发出的光的混合,由于每台发射机所处的空间位置不同,所以光的强度有所差别。探测器将光信号转换为电信号,经过放大之后,利用信道矩阵 \mathbf{H} 对信号进行处理,恢复出原始的发送信号。信道矩阵 \mathbf{H} 的估计是非成像 MIMO 系统建模复杂且重要的部分,其具体的计算过程参见文献^[21]。

为了恢复出原始的发送信号,需要将接受到的信号乘以信道矩阵 \mathbf{H} 的逆,所以为了 MIMO 系统的正常运行, \mathbf{H} 必须是满秩的(\mathbf{H} 可逆)。但是在实际情况中, \mathbf{H} 是满秩的条件很难完全满足,因此一般认为非成像 MIMO 系统不实用。为了实现 MIMO 系统的实用化,研究者们提出了成像 MIMO 系统。

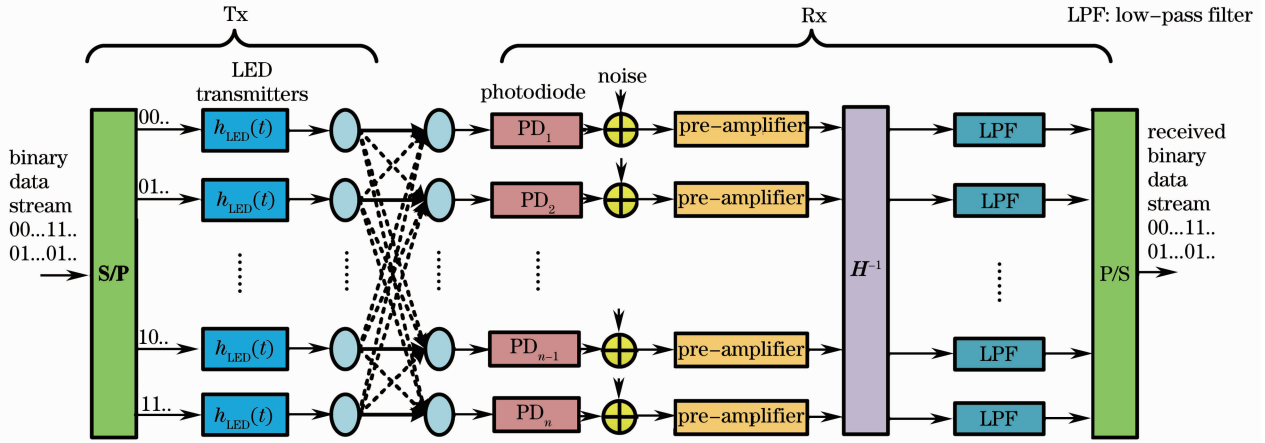


图5 非成像 MIMO-VLC 系统原理框图

Fig. 5 Block diagram of non-imaging MIMO-VLC system

2.4.2 成像 MIMO-VLC 系统

成像 MIMO-VLC 系统的原理框图如图 6 所示。成像接收机代替了非成像设备。与之前一样,从 N_t 台 LED 阵列发射器发出的光传播到接收机,每个 LED 阵列都在检测器阵列上成像,图像可能是阵列上的任意像素或任意一组像素。检测器阵列上的每个像素就是一个接收机信道,通过测量描述每个像素与每台 LED 阵列发射机之间的光学连接特性的 H 矩阵(MIMO 处理),接收到的信号能够被分离开来。在仔细设计的光学系统中,检测器阵列的间距和探测器的数目可以使得在宽范围内的几何条件下, H 矩阵为满秩的条件得到保证。

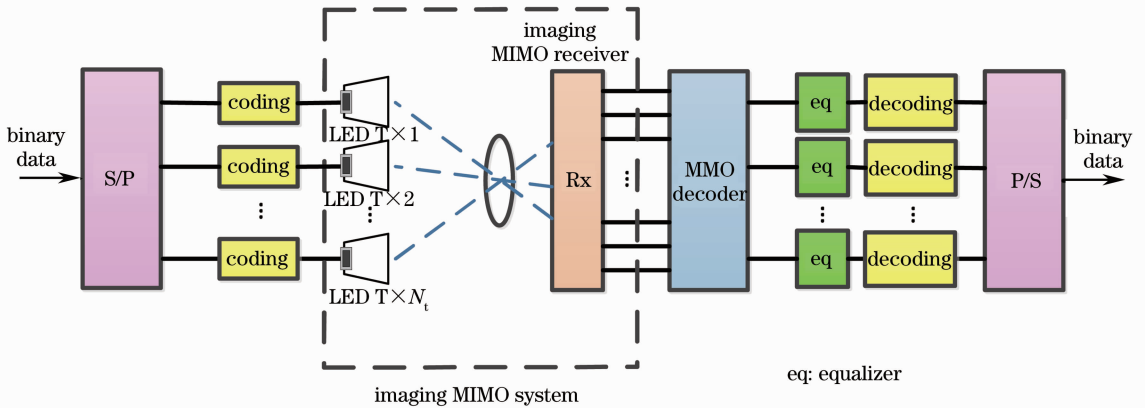


图6 MIMO-VLC 系统框图

Fig. 6 Block diagram of MIMO-VLC system

成像 MIMO-VLC 的系统设计参见文献[21]。该系统的仿真结果表明,利用 LED 进行并行传输,吉比特每秒的速度是可行的,但是实验速率仍然受到成像探测器件的限制。目前,成像 MIMO-VLC 系统的实验传输速率可以达到 220 Mb/s ^[16],该实验采用了 DMT 技术。

2.5 波分复用技术

研究者们对提高基于荧光粉 LED 的 VLC 系统的传输速率已经做出了许多努力。另一种类型的白光 LED,即 RGB-LED,虽然现在的应用还不是特别广泛,但是由于其调制带宽高的优点,有望成为高速 VLC 系统的主要光源,所以研究者们对其非常重视。一个传输速率为 100 Mb/s 的基于 RGB-LED 的单信道 VLC 系统已经被报道^[26]。利用 WDM 技术的实时 VLC 系统已经实现,然而速率很低(小于 400 kb/s)^[19,33]。通过将 WDM 技术与 DMT 相结合,基于 RGB-LED 的 VLC 系统已经实现 803 Mb/s 的传输速率^[18],该系统的实验装置如图 7 所示。

实验中采用的光源为商用的 RGB-LED,包含 3 个芯片,分别发射波长为 700 nm (红)、 530 nm (绿)和 470 nm (蓝)的光。为了同时驱动 3 个 LED 芯片(对应于 3 条 WDM 信道),两路不同的 DMT 信号(功率相

同)由软件产生,然后输入到任意波形发生器(AWG)中。从AWG 出口1 出来的 DMT 信号用于调制测试中的 WDM 信道(LED 芯片)。图 7 给出了测试红色芯片的情况。由于缺少第三路独立的输出信号,从AWG 出口2 出来的 DMT 信号调制其他两个芯片(图 7 中为蓝、绿芯片)。在调制光源之前,AWG 的输出信号经放大之后,通过 Bias-tee 与直流信号合为一路信号。

DMT 信号由 $N=32$ 个子载波组成,基带带宽为 $B=50$ MHz(1.5625 MHz 的子载波间隔)。比特和功率加载应用在 $N-1$ 个子载波(除直流之外)上,以适应不同频率的信道质量。

现将近年来 VLC 系统传输实验的典型速率总结在表 1 中。从表中可以看出,VLC 系统的传输速率已经很高,达到 1 Gb/s,但是离实用还有一定距离。

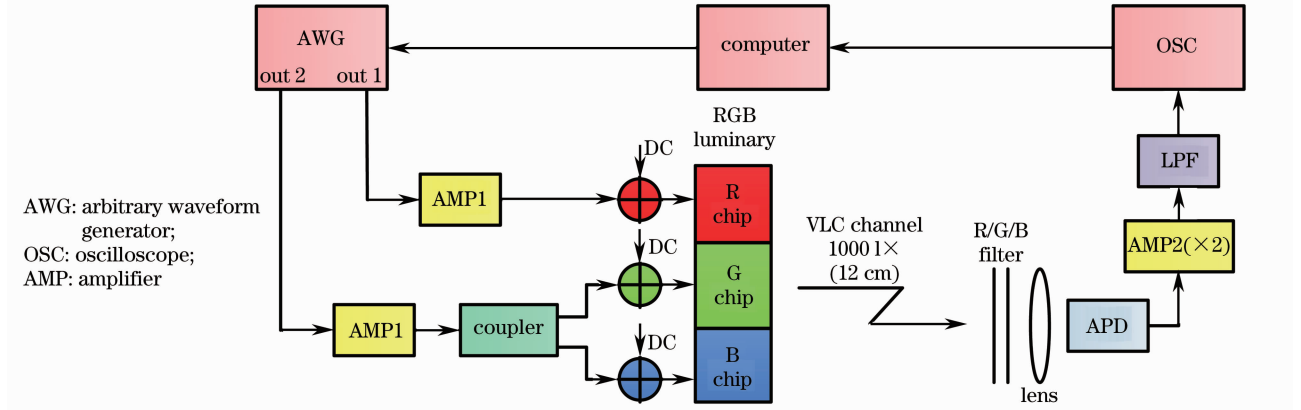


图 7 3 信道 WDM-VLC 系统实验构架

Fig. 7 Experimental setup for 3-channel WDM-VLC system

表 1 VLC 系统实验传输速率总结

Table 1 Summary of experimental transmission data rates for VLC system

Equalization	Modulation scheme	Demonstrated data rate	Receiver	Distance	Research institute	Source
White channel	NRZ-OOK	1022 bit/s	Image sensor	2 km	VLCC	[30]
White channel	Pre NRZ-OOK	40 Mb/s	PIN	2 m	University of Oxford	[9]
Blue channel	Pre OOK-NRZ	80 Mb/s	PIN	10 cm	University of Oxford	[10]
White channel	OOK-NRZ	100 Mb/s	APD	3 m	Nakagawa Laboratories	[27]
Blue channel	Post OOK-NRZ	100 Mb/s	PIN	10 cm	Samsung Electronics	[18]
Blue channel	DMT-QAM	200 Mb/s	PIN	2 m	Fraunhofer HHI	[20]
MIMO white channel	Post DMT-QPSK	220 Mb/s	Image sensor	100 cm	University of Oxford	[19]
Blue channel	DMT-QAM	513 Mb/s	APD	27 cm	Siemens	[11]
RGB	DMT-WDM	803 Mb/s	APD	12 cm	Fraunhofer HHI	[21]
RGB	DMT	806 Mb/s	PIN	8 cm	Fraunhofer HHI	[12]
Blue channel	DMT-QAM	1 Gb/s	APD	10 cm	Scuola Superiore Sant'Anna	[13]

光信号在可见光信道上传输之后,在接收机端,根据测试信道的不同,一个合适的光二向色性的滤波器(红光信道为 Edmund Optics V52-528,绿光信道为 V52-534,蓝光信道为 Berliner Glas 特别设计定制的滤波器)架置于光电二极管之前。一个商用的 APD(直径 3 mm,带宽 80 MHz),结合一个玻璃透镜(数值孔径 0.5,焦距 8 mm)用于探测,将光信号转换为电信号。然后电信号经过两个低阻抗放大器放大,以将信号电平提升到存储示波器的工作范围之内。

在经过一个高阶低通滤波器(LPF,50 MHz 截止)滤波之后,接收信号被一个存储示波器记录,然后进行离线处理。接收到的 DMT 信号被解调和解映射,恢复出原始的发送信号。

此实验中,红、绿、蓝信道的传输速率分别为 293.7、223.4、286 Mb/s,因此总的传输速率为 803 Mb/s。目前,基于 RGB-LED 的单信道 VLC 系统已经实现 806 Mb/s(红)、639 Mb/s(绿)、707 Mb/s(蓝)的传输速率^[21],相信应用 WDM 技术,基于 RGB-LED 的 VLC 系统的传输速率还会增加,达到 Gb/s 量级。

3 结束语

由于白光 LED 的迅速普及,VLC 作为无线接入的一种补充,正面临着发展的良好机遇,但同时也面临着巨大的挑战。其主要的挑战在于白光 LED 有限的带宽,限制了 VLC 系统的传输速率。本文介绍了几种技术,包括蓝光过滤、均衡、DMT、MIMO 技术以及 WDM 技术,使用这些技术中的某种技术,或者几种技术相结合,可以不同程度地提高 VLC 系统的传输速率。

蓝光过滤与均衡技术实现简单,可以增加荧光粉 LED 的调制带宽,在一定程度上可以提高系统传输速率。WDM 技术只适用于采用 RGB-LED 作为光源的 VLC 系统,利用 RGB-LED 调制带宽高、发出三种单色光的特性,可以很大程度地提高系统传输速率。要进一步提高速率,需要采用高阶调制格式,如 QAM-DMT,但是同时也增加了系统的复杂程度。由于受成像探测器限制,MIMO 技术目前实现的速率并不高,但却是最有前景的技术。通过采用高阶调制格式提高系统传输速率,调制阶数越高,系统越复杂,接收机的灵敏度要求也越高,因此必然遇到瓶颈。然而 MIMO 技术可以在有限的带宽上,通过空间复用实现高速通信,因此随着技术的发展,MIMO 技术很可能成为未来高速 VLC 系统的最佳选择。

参 考 文 献

- 1 Klaus-Dieter Langer, Jelena Vučić, Christoph Kottke *et al.*. Advances and prospects in high-speed information broadcast using phosphorescent white-light LEDs [C]. ICTON, 2009. Mo. B5.3
- 2 Kaiyun Cui, Gang Chen, Zhengyuan Xu *et al.*. Line-of-sight visible light communication system design and demonstration [C]. CSNDSP 2010, 2010. OWC-21
- 3 Abu Bakar Siddique, Muhammad Tahir. Joint brightness control and data transmission for visible light communication systems based on white LEDs [C]. 8th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2001
- 4 Y. Tanaka, S. Haruyama, M. Nakagawa. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [C]. Indoor and Mobile Radio Communications, 2000, **2**: 1325~1329
- 5 Juan Pablo Conti, What you see is what you send [J]. *Engineering & Technology*, 2008, **3**(19): 66~69
- 6 Hoa Le Minh, Dominic O'Brien, Grahame Faulkner *et al.*. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(14): JULY 15, 1243~1245
- 7 Hoa Le Minh, Dominic O'Brien, Grahame Faulkner *et al.*. 80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED [C]. ECOC 2008, 2008. P. 6.09
- 8 Jelena Vučić, Christoph Kottke, Stefan Nerreter *et al.*. 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(24): 3512~3518
- 9 Christoph Kottke, Kai Habel, Liane Grobe *et al.*. Single-channel wireless transmission at 806 Mbit/s using a white-light LED and a PIN-based receiver [C]. ICTON, 2012. We. B4.1
- 10 A. M. Khalid, G. Cossu, R. Corsini *et al.*. 1-Gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation [J]. *IEEE Photon. J.*, 2012, **4**(5): 1465~1473
- 11 Fang-Ming Wu, Chun-Ting Lin, Chia-Chien Wei *et al.*. 1.1-Gb/s white-LED-based visible light communication employing carrier-less amplitude and phase modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(19): 1730~1732
- 12 J. Grubor, S. C. J. Lee, K.-D. Langer *et al.*. Walewski, Wireless high-speed data transmission with phosphorescent

- white light LEDs [C]. ECOC 2007, 2007, 1~2
- 13 S.-B. Park, D. K. Jung, H. S. Shin *et al.*. Information broadcasting system based on visible light signboard. Proc. Wireless Opt. Commun., 2007. 311~313
 - 14 Klaus-Dieter Langer, Jelena Vučić, Christoph Kottke *et al.*. Exploring the potentials of optical-wireless communication using white LEDs [C]. ICTON, 2011. Tu.D5.2
 - 15 Hoa Le Minh, Dominic O'Brien, Grahame Faulkner *et al.*. 100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(15): 1063~1065
 - 16 Ahmad Helmi Azhar, Tuan-Anh Tran, Dominic O'Brien. Demonstration of high-speed data transmission using MIMO-OFDM visible light communications [C]. IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications, 2010, 1052~1056
 - 17 J. Vučić, C. Kottke, S. Nerreter *et al.*. White light wireless transmission at 200+ Mb/s net data rate by use of discrete-multitone modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(20): 1511~1513
 - 18 Jelena Vučić, Christoph Kottke, Kai Habel *et al.*. 803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary [C]. OSA/OFC/NFOEC, 2011. OWB6
 - 19 Talha A. Khan, Muhammad Tahir, Ahmad Usman. Visible light communication using wavelength division multiplexing for smart spaces [C]. 2012 IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2012. 230~234
 - 20 Nan Chi. Full-duplex 64 QAM-SCM-OFDM transmission over RGB-LED-based visible light communication [C]. IWOO' 2012, 2012. TA1
 - 21 Lubin Zeng, Dominic C. O'Brien, Hoa Le Minh *et al.*. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting [J]. *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, 2009, **27**(9): 1654~1662
 - 22 Dominic O'Brien. Optical multi-input multi-output systems for short-range free-space data transmission [C]. CSNDSP, 2010. 517~521
 - 23 Dominic O'Brien. Multi-input multi-output (MIMO) indoor optical wireless communications [C]. 2009 Conference on Signals, Systems and Computers, 2009. 1636~1639
 - 24 Yiguang Wang, Minglun Zhang, Yuanquan Wang *et al.*. Experimental demonstration of visible light communication based on sub-carrier multiplexing of multiple input single output OFDM [C]. OECC, 2012
 - 25 Fang Yan, Yuanquan Wang, Yiguang Wang *et al.*. Experimental demonstration of sub-carrier multiplexing-based MIMO-OFDM system for visible light communication [C]. APCC, 2012, 745~746
 - 26 Xin Lin, Kenichi Ikawa, Hirohashi Kazutoshi. High-speed full-duplex multiaccess system for LED-based wireless communications using visible light [C]. International Symposium on Optical Engineering and Photonic Technology: OEPT 2009, 2009, 1~5
 - 27 Chen Zhiping, Liang Zhongcheng, Ma Zhengbei *et al.*. Modulation technology of the visible light parallel communication system based upon 2D-bar code [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s105008
陈治平, 梁忠诚, 马正北 等. 基于二维码的可见光并行通信系统信号调制技术[J]. 中国激光, 2012, **39**(s1): s105008
 - 28 Li Rongling, Tang Chanjuan, Wang Yuanquan *et al.*. A MISO-OFDM visible light communication system using LED based on subcarrier multiplexing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1105001
李荣玲, 汤婵娟, 王源泉 等. 基于副载波复用的多输入单输出正交频分复用 LED 可见光通信系统[J]. 中国激光, 2012, **39**(11): 1105001
 - 29 Zhang Jiankun, Yang Yu, Liu Bo *et al.*. Design of home network based on visible light communication and power line carrier communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 100604
张建昆, 杨宇, 刘博 等. 基于可见光和电力线载波的家庭网络设计[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(10): 100604
 - 30 Yang Yu, Zhang Jiankun, Liu Bo *et al.*. Study of the impact of LED nonlinearity on orthogonal frequency division multiplex based visible light communication systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805007
杨宇, 张建昆, 刘博 等. LED 非线性对基于正交频分复用可见光通信系统的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0805007
 - 31 Zhang Jiankun, Yang Yu, Chen Hongda. Modulation scheme analysis of indoor visible light communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405003
张建昆, 杨宇, 陈弘达. 室内可见光通信调制方法分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 0405003
 - 32 L. Zeng, D. O'Brien, H. Le-Minh *et al.*. Improvement of data rate by using equalization in an indoor visible light communication system [C]. ICCSC, 2008. 678~682
 - 33 Natasha Shrestha, Muhammad Sohail, Charusluk Viphavakit *et al.*. Demonstration of visible light communications using

- RGB LEDs in an indoor environment [C]. ECTI-CON, 2010. 1159~1163
- 34 S. Jivkova, B. Hristov, M. Kavehrad. Power-efficient multisport-diffuse multiple-input-multiple-output approach to broadband optical wireless communications [J]. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2004, **53**(3): 882~889
- 35 S. Hranilovic, F. Kschischang. A pixelated MIMO wireless optical communication system [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(4): 859~874
- 36 M. Garfield, Chao Liang, T. Kurzweg *et al.*. MIMO space-time coding for diffuse optical communication [J]. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 2006, **48**(6): 1108~1110
- 37 D. C. O'Brien. Indoor optical wireless communications: recent developments and future challenges [C]. *SPIE*, 2009, **7464**: 74640B