

基于 LED 的高速可见光通信

迟楠, 卢星宇, 王灿, 周盈君

复旦大学信息科学与工程学院通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 到 2018 年, 普通发光二极管(LED)的普及率将达到 80%。基于 LED 的可见光通信(VLC)技术有望为高速 VLC 的实现提供新方案。国内外研究者们分别对先进调制、编码/均衡、复用技术及材料/芯片等进行了研究, 以扩展调制带宽、提高传输速率和增加传输距离。对载波幅相调制、自适应比特功率加载的正交频分复用调制、硬件/软件预均衡、后均衡等技术以及新型光学材料的原理和性能等国际研究热点进行了分析与讨论, 对最新的研究进展进行了总结, 从而为未来 VLC 的研究提供一定的参考。

关键词 光通信; 高速可见光通信; 发光二极管; 先进调制; 预均衡; 后均衡

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0300001

High-Speed Visible Light Communication Based on LED

Chi Nan, Lu Xingyu, Wang Can, Zhou Yingjun

Key Laboratory of EMW Information, Department of Communication Science and Engineering, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract By the year of 2018, the popularizing rate of common light emitting diode (LED) will reach 80%. The visible light communication (VLC) technology based on LED is expected to provide new scheme for the implementation of high-speed VLC. Researchers at home and abroad have studied technologies of modulation, coding or equalization and multiplexing, materials and chips in order to broaden the modulation bandwidth, improve the transmission rate and increase the transmission distance. The international research hotspots are analyzed and discussed, including technologies of carrier amplitude-phase modulation, orthogonal frequency division multiplexing modulation with adaptive bit power loading, hardware or software pre-equalization and post-equalization, and the principle and the performance of novel optical material. The latest researches are summarized in order to offer a reference for the future research of VLC.

Key words optical communications; high-speed visible light communication; light emitting diode; advanced modulation; pre-equalization; post-equalization

OCIS codes 060.2330; 060.4080

1 引言

2000 年, 可见光通信(VLC)的概念被提出, VLC 技术利用发光二极管(LED)作为光源, 在用于照明的同时也可用于高速通信。VLC 技术在最近十几年得到飞速发展的原因主要有以下两个方面: 1) 随着现代通信技术的高速发展, 无线频谱资源日趋紧张, 很多频段都已经被占用, 可见光是有待研究的最后一个空白领域, 可见光频段介于 400~800 THz 之间, 是目前正在使用的无线通信载频频段(2.5~5 GHz)的一万倍左右, 因此 VLC 技术抢占了空白频谱, 有效利用资源, 拓展了下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; 2) VLC 利用白光 LED 作为光源。于 20 世纪 60 年代问世的 LED 在短短数 10 年内经历了光色从单色到多色、亮度从低到高、寿命从短到长、市场从无到有的发展。LED 诞生至今以每 10

收稿日期: 2016-10-10; **收到修改稿日期:** 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61571133)

作者简介: 迟楠(1974—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光纤通信与高速可见光通信方面的研究。

E-mail: nanchi@fudan.edu.cn

年亮度提高 20 倍、价格降低为原来的 1/100 的速度发展。LED 技术的日趋成熟以及功能的不断完善和丰富给人类社会带来了翻天覆地的变化,其影响已经渗透到全球科技、经济、生活等各个领域,在照明领域尤其具有强大的优势和竞争力。与白炽灯和节能灯相比,LED 具有效率高、价格低及寿命长等优点。LED 的能耗分别是白炽灯的 1/10 和节能灯的 1/4,发光效率可达到 249 lm/W(约为日光灯的 4 倍),寿命高达 10^5 h,其稀土添加量仅为节能灯的 1/1000。LED 这些优良的性能使其迅速占据了市场,各国陆续推出了白炽灯淘汰计划,传统照明技术正在迅速向固体照明技术发展,LED 成为下一代照明技术已是大势所趋。固态照明的普及使 VLC 的光源无处不在,将 LED 作为光源的 VLC 也将随着 LED 的发展而快速发展。

与其他无线技术相比,VLC 有以下明显的优势:1)白光对人眼的伤害较小;2)室内白光 LED 的功率之和高达 10 W 以上,使 VLC 具备了非常高的信噪比,为实现高速通信打下了良好的基础;3)白光和射频信号不存在相互干扰,无电磁污染,可应用于核电站、机舱、医院、工业控制等电磁敏感的环境中;4)VLC 兼具照明、通信和控制定位等功能,符合国家节能减排战略;5)白光不可穿透墙壁甚至窗帘,因此 VLC 具有高度的保密性;6)频谱无需授权即可使用。因此,VLC 应用灵活,既可以单独使用,也可以作为射频无线设备的有效备份。

VLC 技术以其特殊的优势,一问世便迅速得到世界各国的关注和支持。2000 年,Tanaka 等^[1]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。VLC 技术在 10 年间得到迅速发展,并取得了一个又一个突破性的进展。目前,国外的主流设备商和各个大学、研究所等都在开展有关 VLC 技术的研究^[2-7],具有代表性的研究小组主要有日本的松下、电报电话公司、可见光通信联盟、庆应义塾大学、名古屋大学、中川实验室,德国的海因里希赫兹研究所、西门子实验室,英国的牛津大学、爱丁堡大学、斯特拉斯克莱德大学、桑诺比亚大学,美国的波士顿大学、加利福尼亚大学,中国的台湾交通大学、工业技术研究院、远东科技大学、暨南大学、北京邮电大学、复旦大学、东南大学、中国科学院半导体研究所、华中科技大学等。

2 VLC 的关键技术

2.1 系统结构

基于白光 LED 的 VLC 系统示意图如图 1 所示,该系统包括完整的发射(Tx)、信道传输和接收(Rx)三个部分。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,从而将电信号(E)转换为光信号(O)。

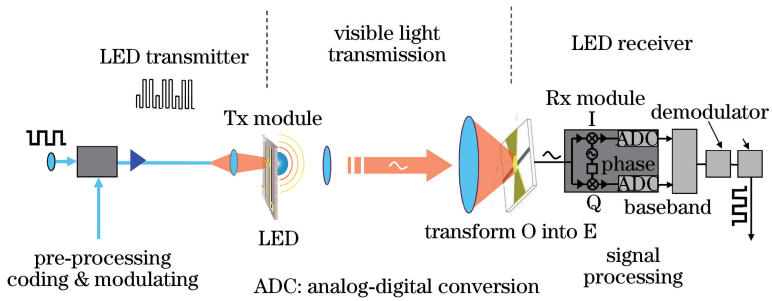


图 1 基于白光 LED 的 VLC 系统示意图

Fig. 1 Diagram of VLC system based on white LED

限制 VLC 系统传输速率提高的主要原因为白光 LED 有限的调制带宽,目前广泛使用的荧光粉 LED 的调制带宽一般小于 10 MHz^[8],因此如何提高 LED 的调制带宽和系统传输速率成为研究者们研究重点。

为了提升 VLC 的传输效率,研究者们分别从光器件、材料及多维多阶的调制编码方式 3 个方面进行了研究。图 2 为基于 LED 的 VLC 的研究方向脉络图。调制方式包括二进制启闭键控(OOK)、脉冲位置调制(PPM)、正交频分复用(OFDM)、无载波幅相(CAP)调制技术等;编码/均衡技术包含网格编码、预均衡、后均衡,按软件硬件区分的软件均衡、硬件均衡,为实现高速 VLC 系统而采用的频分复用、波分复用、多输入多输出(MIMO)技术等。下文将围绕其中的部分最新成果展开综述。

2.2 先进调制技术

商用系统多采用二进制消息传递,谱效率仅为 0.2 bit/(s · Hz)。传统无线通信领域采用多电平调制和

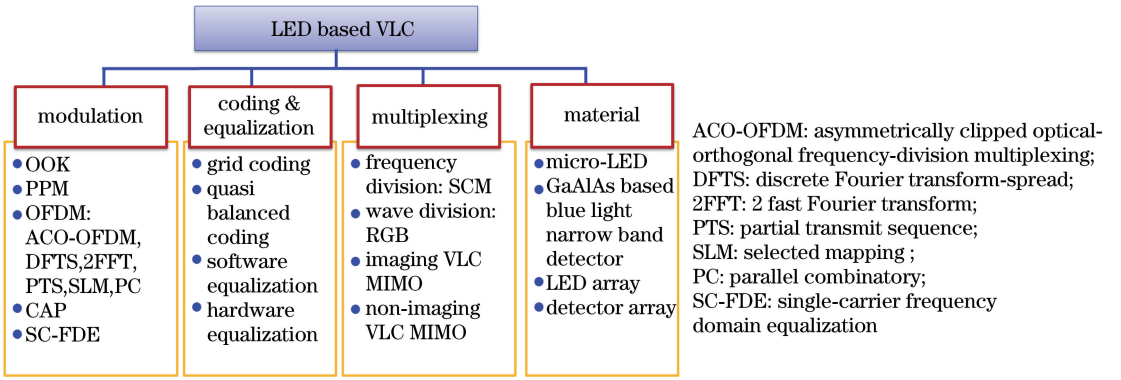
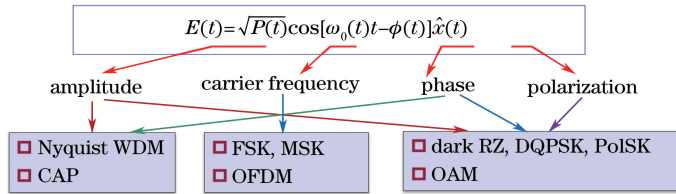


图 2 基于 LED 的 VLC 的研究方向脉络图

Fig. 2 Research orientation diagram of VLC based on LED

高阶调制, 谱效率已经接近香农极限。在单模光纤中, 光域里可以用来传递信息的物理量有 4 个, 即幅度 $[p(t)]$ 、相位 $[\phi(t)]$ 、频率 $[\omega_0(t)]$ 、偏振 $[\hat{x}(t)]$ 。根据用于传递数据信息的物理量的不同, 可将调制格式分为幅度、相位、频率和偏振 4 种数据调制格式, 光调制方式与光信号电场 $[E(t)]$ 参量的关系如图 3 所示。上述这种分类方法并不要求相位调制时其幅度值恒定, 也不要求强度调制时其相位保持不变, 这种分类方法是由传递数据信息的物理量决定的, 如差分相移键控 (DPSK) 是相位调制格式, 但不需考虑传输 DPSK 信号时是以恒定包络传输还是以归零 (RZ) 形式传输。



WDM: wavelength division multiplexing; FSK: frequency shift keying; MSK: minimum shift keying; OAM: orbital angular momentum; DQPSK: differential quadrature reference phase shift keying; PoISK: polarization shift keying modulation

图 3 光调制方式与光信号电场参量的关系

Fig. 3 Relationship between light modulation mode and optical signal electric field parameters

目前, 较为先进且已经用于 VLC 的调制技术主要包括正交频分复用、无载波幅相调制技术和奈奎斯特单载波 (N-SC)。

2.2.1 CAP 调制

CAP 调制是一种目前在可见光领域具有广泛应用前景的多维多阶调制技术, 于 20 世纪 70 年代由贝尔实验室提出, CAP 调制具有较低的复杂度和较高的频谱效率^[9-11]。与传统的正交振幅调制 (QAM) 和 OFDM 相比, CAP 调制采用了两个相互正交的数字滤波器, 因此 CAP 调制不再需要电或者光的复数信号到实数信号的转换, 而这种较为复杂的转换通常需要一个混频器、射频源或者一个光同相正交 (IQ) 调制器来实现。相比于 OFDM, CAP 调制也不再需要采用离散傅里叶变换 (DFT), 极大减小了计算复杂度和简化了系统结构。因此 CAP 调制适用于低复杂度的系统中, 如无源光纤网络 (PON) 和 VLC 等。

CAP 调制原理如图 4 所示。图 4 中 $a(t)$ 、 $b(t)$ 分别为利用 M 因子进行上采样的原始周期信号, $s(t)$ 是由将经过同相整形滤波器的 $a(t)$ 和经过正交整形滤波器的 $b(t)$ 相加得到的, $r(t)$ 为经过光信道传输后接收到的信号, $r_1(t)$ 为 $r(t)$ 同相匹配滤波器滤波后的信号, $r_Q(t)$ 为 $r(t)$ 经过正交匹配滤波器滤波后得到的波形。首先, 在 CAP 发送端将原始信号以 T 为符号周期编码至复数信号, 并用 M 因子对信号序列进行上采样, 比如, 插入 $M-1$ 个 0 以实现频谱的 M 次延拓。将上采样信号的同相正交分量分离, 分别按组加正交滤波器, 经过滤波后生成的 CAP 信号可以表示为

$$s(t) = I(t) \otimes f_1(t) - Q(t) \otimes f_Q(t), \quad (1)$$

式中 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 分别为分离出的同相分量和正交分量, $f_1(t)$ 和 $f_Q(t)$ 分别为作用于 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 的滤波

函数。

CAP 接收端接收到的信号被送入一个匹配滤波器,对分离的同相分量和正交分量进行匹配滤波,匹配滤波器和模数(A/D)转换器的工作速率为 M/T 。在假设的理想响应信道下,接收端的两个匹配滤波器的输出可表示为

$$\begin{cases} r_1(t) = s(t) \otimes m_1(t) = [I(t) \otimes f_1(t) - Q(t) \otimes f_q(t)] \otimes m_1(t) \\ r_q(t) = s(t) \otimes m_q(t) = [I(t) \otimes f_1(t) + Q(t) \otimes f_q(t)] \otimes m_q(t) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $m_1(t)$ 和 $m_q(t)$ 分别为分离的同相分量和正交分量对应匹配滤波器的滤波函数。进行下采样后,利用一个后均衡器和一个解码器即可获得原始信号序列。

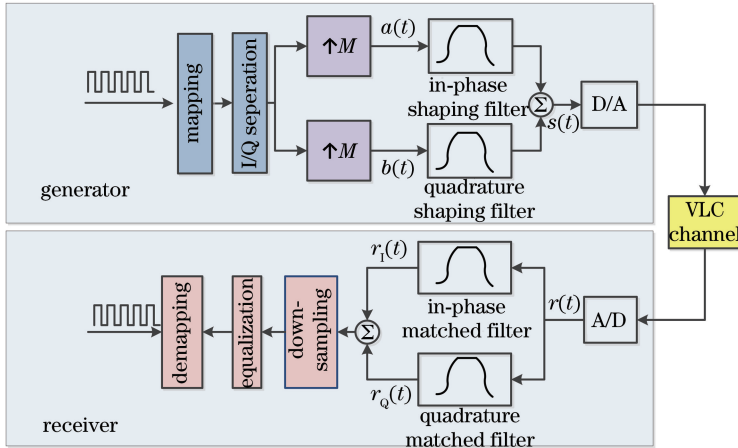


图 4 CAP 调制原理图

Fig. 4 Schematic of CAP modulation

CAP 调制具有结构简单、计算复杂度较低的特点,在 VLC 中具有很大的应用价值。采用 CAP 调制技术的 VLC 已经在文献[12]的实验中得到了验证。2014 年以来,复旦大学的研究团队分别用高阶 CAP 和不同的均衡方案实现了多次传输速率的提升。2014 年,Wang 等^[13]通过软件预均衡和基于级联多模算法(M-CMMA)的均衡方案实现 1.35 Gbit/s 的传输速率,之后进一步用非线性的后均衡技术实现了 4.5 Gbit/s 的传输速率^[14]。2015 年,Wang 等^[11]用级联的线性和非线性混合后均衡技术成功实现了 8 Gbit/s 的传输速率,这是 VLC 领域现有文献报道的利用 CAP 调制达到的最高速率。在户外实验中,Wang 等^[15]利用 CAP 调制技术在 50 m 距离内实现了传输速率为 1.8 Gbit/s 的可见光传输。

2.2.2 自适应比特功率加载的 OFDM 调制

OFDM 是一种新型高效的编码技术,属于多载波调制的一种,它能有效抵抗多径干扰,使受干扰的信号被可靠的接收,同时,信号的频带利用率也大大提高。OFDM 技术的基本思想是将高速串行数据变换为多路相对低速的并行数据,并将其调制到每个子信道上进行传输,每个子信道上的信号带宽小于信道的相关带宽,因此每个子信道上的信号可以视为平坦性衰落。这种并行传输体制大大扩展了符号的脉冲宽度,提高了抗多径衰落的性能。通过在接收端采用相关技术,可将正交信号分开,从而减小了子信道间码间串扰(ISI)。传统的频分复用方法中各个子载波的频谱互不重叠,需要使用大量的发送滤波器和接收滤波器,大大增加了系统的复杂度和成本。同时,为了减小各个子载波间的相互串扰,各子载波间必须保持足够的频率间隔,这样会降低系统的频率利用率。现代 OFDM 系统各子载波的产生和接收都由数字信号处理算法完成,极大地简化了系统的结构。

与其他调制格式不同的是,OFDM 发射端的处理过程包括 QAM 映射、串并变换、离散傅里叶逆变换(IDFT)、加循环前缀和并串变换,接收端的处理过程和发射端相反。在每一个发射端,信息序列经过串并变换变为 N 个并行符号,并在每个支路进行单独调制。调制后的并行符号经过快速傅里叶逆变换(IFFT)变为 N 个不同子载波的集合,然后再加上保护间隔,这样便产生了 OFDM 信号。产生的 OFDM 信号经功率放大器放大后,再通过偏置树,使信号工作在 LED 的工作区。OFDM 信号经过 LED 变成光强度信号被发射出去。在接收端,光强度信号经过光电二极管(PD)转换为电流信号,这样便可接收到 OFDM 已调制信

号,再经过 OFDM 解调过程后,原始信号被还原出来。循环前缀的作用是用来避免多径干扰产生的时延。

图 5 为 OFDM 自适应比特功率加载算法流程图,系统根据发射的二进制相移键控(BPSK)信号进行子载波信噪比(SNR)的估计,根据估测的 SNR 值进行子载波比特分配。在复旦大学的相关实验中,循环前缀为 3%,训练序列为 2%^[16]。采用差分接收机进行数据的离线处理时,将采集到的数据进行同步后直接相减,再进行解调,计算出误码率(BER)。该实验展示了基于单一的市售磷光白色 LED 的高速 VLC 系统,该 VLC 系统采用了预均衡技术,结合 OFDM 自适应比特功率加载算法,成功实现了 VLC 链接,1.5 m 自由空间传输时,传输速率可达 2 Gbit/s^[16]。

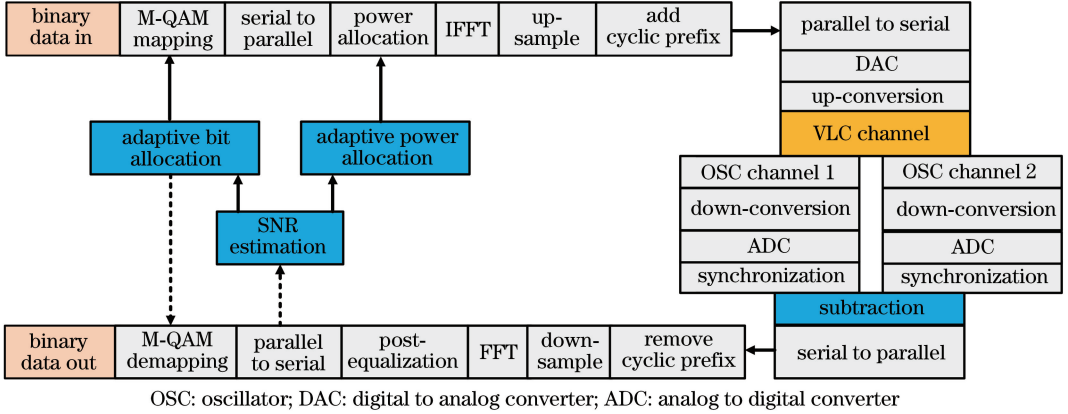


图 5 OFDM 自适应比特功率加载算法流程图^[19]

Fig. 5 Flow diagram of OFDM adaptive bit power loading algorithm^[19]

2.3 预均衡

预均衡(即预处理)可补偿器件和信道对信号造成的失真,提高传输速率和 LED 的响应带宽。在接收端进行的后均衡可以补偿相位噪声等其他信道损耗。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 VLC 带宽的限制,为了提高白光 LED 通信系统的传输速率,在发射端采用高阶调制编码技术来提高传输的频谱效率,从而实现高速传输。

基于可见光信道的特点,信道的不平坦会给数据的高速传输带来很大的障碍,虽然采用 OFDM 调制技术可以在一定程度上优化系统性能,但要使系统容量进一步得到提升还需要采用各种均衡技术。均衡技术主要分为两种:软件均衡和硬件均衡。其中软件均衡主要涉及数字信号处理,硬件均衡主要涉及电路的设计。

2.3.1 硬件预均衡

利用硬件来实现预均衡的技术称为硬件预均衡技术。目前,基于硬件预均衡技术来提高 VLC 系统的带宽被证明是一种非常有效的方式。2013 年,Fujimoto 等^[17]将模式逻辑(CML)电路和简单的电阻和电容(RC)预均衡电路作为 LED 的驱动电路,将商用红绿蓝(RGB) LED(数据传输采用红光 LED)作为发射天线,将低成本 PIN 作为光接收机,利用 OOK-NRZ 调制技术实现了红光在系统中 40 cm 的传输距离以及 477 Mbit/s 的传输速率,且误码率低于 10^{-9} 。

2015 年,Huang 等^[18]提出了一种桥 T 幅度均衡器,这是一种适用于高速可见光系统中的定阻对称桥 T 型幅度均衡器,该均衡器具有优异的线性度和阻抗匹配性能,可使用商用红光 LED 和雪崩二极管(APD)接收机实现 64QAM-OFDM 750 Mbit/s 的数据传输。

图 6 为在 VLC 系统中使用的桥 T 幅度均衡器示意图。该均衡器中, Z_{11} 为由电阻 R_1 、电容 C_1 和电感 L_1 组成的 RLC 网络 1 的等效阻抗, Z_{22} 为由电阻 R_4 、电容 C_2 和电感 L_2 组成的 RLC 网络 2 的等效阻抗, Z_s 为输入阻抗, Z_L 为输出阻抗,电路中的电阻 R_2 和 R_3 都等于 R_0 。 Z_{11} 、 Z_{22} 可分别表示为

$$Z_{11} = \left[R_1 \times \left(\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 \right) \right] / \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 \right), \quad (3)$$

$$Z_{22} = \frac{1}{j\omega C_2} \times j\omega L_2 / \left(\frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 + R_4 \right), \quad (4)$$

式中 ω 为角频率。为了使条件 $Z_{11}Z_{22} = R_0^2$ 对任意 ω 成立,需要满足 $L_1/C_2 = L_2/C_1 = R_1R_4 = R_2R_3 = R_0^2$,

则该均衡器的传递函数应为

$$S_{21} = 1 / \left[1 + R_L / \left(R_4 + \frac{j\omega L_1}{1 - \omega^2 C_1 L_1} \right) \right], \quad (5)$$

式中 R_L 为负载电阻。

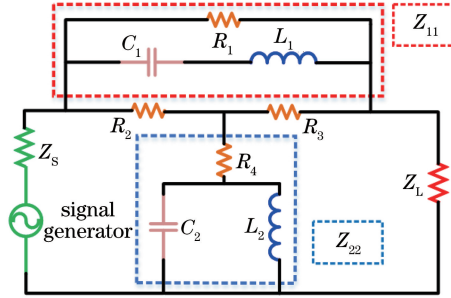


图 6 桥 T 幅度均衡器原理图

Fig. 6 Diagram of bridge T amplitude equalizer

由于单个幅度均衡器的动态均衡幅度有限,不能较好地补偿 VLC 系统, Huang 等^[19]引入级联桥 T 型幅度均衡器,更好地优化了 VLC 系统的信道。

双级联幅度均衡器可以分为如图 7(a)所示的两个相同的单个幅度均衡器和如图 7(b)所示的两个不同的幅度均衡器(双级联异构幅度均衡器)。双级联同构幅度均衡器的传递函数为

$$S_{21} = 1 / \left[1 + R / \left(R_4 + \frac{j\omega L_1}{1 - \omega^2 C_1 L_1} \right) \right]^2. \quad (6)$$

双级联异构幅度均衡器的传递函数为

$$S'_{21} = 1 / \left[1 + \frac{R_L}{R_4 + j\omega L_1 / (1 - \omega^2 C_1 L_1)} \right] \left[1 + \frac{R_L}{R_8 + j\omega L_3 / (1 - \omega^2 C_3 L_3)} \right]. \quad (7)$$

双级联同构、异构幅度均衡器都是由两个单桥 T 幅度均衡器级联而成,但双级联异构幅度均衡器可以实现更多的参数调整。双级联同构幅度均衡器和单个幅度均衡器特性相同,同样,在 $L_1 = L_2$ 、 $C_1 = C_2$ 、负载 R_L 一定的条件下, R_4 决定 S_{21} 和 H_{channel} 的低频特性,并且双级联同构幅度均衡器的低频衰落更大,因此对于可见光信道的补偿作用更强。

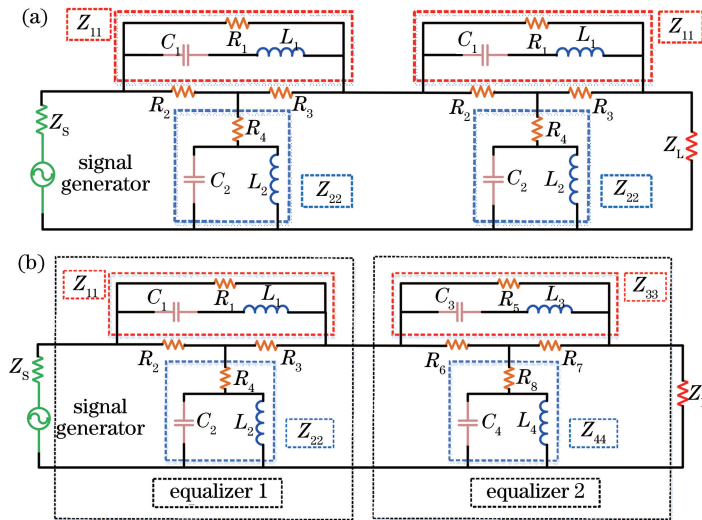


图 7 (a) 双级联同构幅度均衡器; (b) 双级联异构幅度均衡器

Fig. 7 (a) Double cascade isomorphism amplitude equalizer; (b) double cascade heterogeneous amplitude equalizer

采用不同的单个幅度均衡器设计的双级联异构幅度均衡器可调节更多的参数,可以更好地匹配和补偿可见光信道,所设计的整个 VLC 系统信道带宽更宽。 Huang 等^[16]利用双级联桥 T 幅度均衡器实现了基于

商用磷光白色 LED 和 16QAM-OFDM 的传输距离为 1 m、传输速率为 1.6 Gbit/s 的可见光传输。进一步使用单个桥 T 幅度均衡器和 OFDM 自适应比特功率加载实现了传输距离为 1.5 m、传输速率为 2 Gbit/s 的商用磷光白色 LED 的 VLC 传输。

2.3.2 软件预均衡

现有的均衡方案大多采用传统的模拟电路实现,虽然能够在一定程度上增加系统的带宽,但是仍然存在很大的局限性:1)模拟电路存在时间抖动,抗干扰能力弱,带宽受限,不适用于高速率信号的传输;2)可见光信道受环境噪声的影响较大,对均衡器调节的灵活性有较高的要求,而模拟电路不能根据实际信道的需要进行调试与改进。

软件均衡技术可以根据系统需求灵活调节,具有一系列的优点。因此,研究人员对基于软件的均衡技术进行了研究,实现了基于有限长单位冲激响应(FIR)滤波器的预均衡技术^[13]。

FIR 滤波器系统的输入输出差分方程为

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k), \quad (8)$$

式中 $h(k)$ 为单位冲击响应, $x(n-k)$ 为系统输入函数, $y(n)$ 为系统输出函数。FIR 滤波器的系统函数为

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n}, \quad (9)$$

式中 $X(z)$ 、 $Y(z)$ 分别为系统输入和输出的响应函数。

FIR 滤波器的单位脉冲响应 $h(n)$ 是一个有限长序列, $H(z)$ 是 z^{-1} 的 $N-1$ 次多项式,它在 Z 平面上有 $N-1$ 个零点,同时在原点有 $N-1$ 阶重极点,因此, $H(z)$ 永远稳定。FIR 滤波器设计的任务是选择有限长度的 $h(n)$,使传输函数 $H[\exp(j\omega)]$ 满足一定的幅度特性和线性相位要求。由于 FIR 滤波器很容易实现严格的线性相位,所以 FIR 滤波器设计的核心思想是求出有限的脉冲响应来逼近给定的频率响应。

FIR 滤波器的设计方法主要包括窗函数设计法和频率抽样设计法,其中窗函数法更为常用。使用窗函数法设计 FIR 滤波器的过程为:1)给定要设计的滤波器频率响应函数 $H[\exp(j\omega)]$;2)求出滤波器单位脉冲响应 $h(n) = \text{IFFT}\{H[\exp(j\omega)]\}$;3)选定窗函数 $w(n)$ 及窗口大小(即滤波器阶数) N ,常用的窗函数有矩形窗、角窗、Hamming 窗、Kaiser 窗等;4)求得所设计的 FIR 滤波器的单位抽样响应 $h_d(n) = h(n)w(n)$;5)得到 FIR 滤波器的频率响应函数 $H_d[\exp(j\omega)] = \mathcal{F}[h_d(n)]$,并检验是否满足设计要求。

综上所述,FIR 滤波器的优点为:1)具有任意的幅频特性;2)具有严格的线性相位;3)单位抽样响应为有限长,因此滤波器是稳定的系统;4)总能用因果系统实现(因为只要经过一定的延时,任何非因果有限长序列都能变成因果有限长序列);5)具有有限长的单位冲激响应,可以用 FFT 频率偏移补偿算法实现,可提高运算效率;6)避免了类似于模拟滤波器的时间抖动。因此,FIR 滤波器在通信、图像处理、模式识别等领域都有着广泛的应用。

2.4 后均衡

在可见光传输中,多径现象和信道的频率衰减是不可避免的,特别是引入的频率偏移和相位噪声会造成 OFDM 符号子载波的 ICI 干扰和符号间的 ISI 串扰。因此,除了发射端的预均衡外,用于 VLC 系统接收端的后均衡也是必不可少的,适当的均衡算法可以提升接收信号的质量。

均衡器的本质在于通过加入循环前缀和移除循环前缀,使得发送信号经历的信道响应变为循环矩阵,接收端傅里叶变换后的频域信号严格等于发送端的频域信号与频域信道响应的乘积,因此直接在频域上对信道进行补偿即可恢复发送的频域信号。

OFDM 后均衡分为信道估计和信道补偿。信道估计又分为盲信道估计和导频信道估计。盲信道估计没有冗余信息,利用循环前缀和信号统计特性进行估计;导频信道估计是在数据部分插入一定比例的导频信号进行估计。

导频位置的信道估计常用的方法包括基于最小二乘(LS)算法的信道估计和基于最小均方误差(MMSE)算法的信道估计。基于 LS 信道估计导频位置处的响应矩阵为

$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{P,LS}} = \mathbf{X}_{\text{P}}^{-1} \mathbf{Y}_{\text{P}}, \quad (10)$$

式中 \mathbf{X}_P 为发送信号矩阵, \mathbf{Y}_P 为接收信号矩阵。

如(10)式所示,在导频的子载波位置上进行一次除法运算,便可得到导频位置处的频域信道响应。但是LS算法没有利用信道的时域与频域的相关性,并且忽略了噪声 N 对 H_p 的影响。

基于MMSE算法的信道估计得到导频位置处的响应矩阵为

$$\hat{\mathbf{H}}_{P,MMSE} = \mathbf{R}_{HY} \mathbf{R}_{YY}^{-1} \mathbf{Y}_P = \mathbf{R}_{HH} [\mathbf{R}_{HH} + \sigma_n^2 (\mathbf{X}_P^H \mathbf{X}_P)]^{-1} \mathbf{X}_P^{-1} \mathbf{Y}_P = \mathbf{R}_{HH} [\mathbf{R}_{HH} + \sigma_n^2 (\mathbf{X}_P^H \mathbf{X}_P)]^{-1} \hat{\mathbf{H}}_{P,LS}, \quad (11)$$

式中 \mathbf{R}_{HY} 为接收信号矩阵与信道响应矩阵的相关矩阵, \mathbf{R}_{YY}^{-1} 为接收信号自相关矩阵的逆矩阵, \mathbf{R}_{HH} 为信道响应的自相关矩阵, σ_n^2 为信道噪声方差, \mathbf{X}_P^H 为发送信号的共轭转置矩阵。

求出导频位置处的信道响应矩阵后,再利用差值法估计所有位置的信道响应,最后根据得到的信道响应矩阵并利用迫零算法、MMSE算法或者迭代均衡算法求出信道补偿矩阵 \mathbf{W} 。

为了同时缓解线性和非线性的衰减并且更好地恢复信号,一种混合后均衡方式被提出,所使用的混合均衡器包括两阶滤波器。第一阶滤波器包括一个线性均衡器和基于伏尔特拉级数的非线性均衡器, M-CMMA用来计算误码函数,更新线性和非线性均衡器的权数。第一阶滤波器的输出 $y(n)$ 可表示为

$$y(n) = y_1(n) + y_{nl}(n) = \underbrace{\sum_{i=0}^{N-1} \omega_i(n) x(n-i)}_{y_1(n)} + \underbrace{\sum_{k=0}^{N_{nl}-1} \sum_{l=k}^{N_{nl}-1} \omega_{kl}(n) x(n-k) x(n-l)}_{y_{nl}(n)}, \quad (12)$$

式中 $y_1(n)$ 和 $y_{nl}(n)$ 分别为线性和非线性均衡器的输出, N 和 N_{nl} 分别为线性和非线性均衡器的抽头数, $\omega_i(n)$ 和 $\omega_{kl}(n)$ 分别为线性和非线性均衡器的加权系数。将第一阶滤波器输出的信号输入第二阶滤波器,第二阶段滤波器使用了判决引导最小均方算法(DD-LMS),能够在预收敛之后获得很好的性能。DD-LMS是一种随机梯度下降算法,该算法的结果不取决于信号统计规律,但是依赖信号判决。因此DD-LMS均衡器的输出可表示为

$$y'(n) = \sum_{i=0}^{N_{nd}-1} h_i(n) y(n-i), \quad (13)$$

式中 N_{nd} 为滤波器的抽头数。Le Minh等^[5]在2009年的研究表明,蓝光信道的调制带宽约为14 MHz,采用后均衡技术之后,VLC系统的调制带宽扩展到了50 MHz,在此调制带宽的基础上,采用非归零关健控(NRZ-OOK)调制方式可实现100 Mbit/s的传输速率,并且误码率低于 10^{-9} 。2015年,Wang等^[11]在CAP调制中增加了预均衡和后均衡实验,提出了一种加权预均衡结合混合后均衡的方法。混合后均衡采用线性均衡器、基于伏尔特拉级数的非线性均衡器和DD-LMS。使用加权预均衡结合混合后均衡的方式和CAP调制可成功实现传输速率为8 Gbit/s的室内VLC,提升了可见光通信性能,并且很好地补偿了信道衰落。

2.5 光学材料

VLC系统中使用的光源是白光LED。目前市面上一共有两种类型的白光LED,包括荧光粉LED与RGB-LED。荧光粉LED是使用最为广泛的白光LED,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,但是存在调制带宽很低、频谱利用率不高等问题。荧光粉LED的调制带宽只有几兆赫兹,限制了系统的传输速率,当信号调制方式采用NRZ-OOK时,传输速率最高只能达到10 Mbit/s,这是由黄色荧光粉较慢的响应速度造成的。RGB-LED是通过将红、绿、蓝三色LED芯片封装在一起并将它们发出的光混合在一起得到白光。RGB-LED具有较高的调制带宽,有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和避免闪烁还有待进一步研究。

基于两种类型LED的VLC系统各有优势,基于荧光粉LED的VLC系统容易实现、成本低廉,基于RGB-LED的系统可实现较高的传输速率。

光电探测器将接收到的光信号转换为电信号。对信号进行解调、解码等处理后,可恢复出原始的发送信号。VLC系统可以采用的接收机类型包括基于PIN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的接收机响应速度快、灵敏度高、价格低廉;与基于PIN的接收机相比,基于APD的接收机具有更快的响应速度、更高的灵敏度和信噪比,但价格相对较高。目前的高速VLC系统通常采用基于PIN/APD的接收机^[20]。

如第 2.1 节所述,如何提高 LED 的调制带宽及系统传输速率成为了研究的重点。首先,在探测信号之前,加入一块蓝光滤波器,以滤除响应速度慢的黄光分量,从而将荧光粉 LED 的调制带宽从 3 MHz 提高到了 10 MHz^[21];然后采用均衡技术,调整 LED 的响应频率,将带宽提高了到几十兆赫兹^[22];用 RGB-LED 代替荧光粉 LED 作为光源可以获得更高的调制带宽,采用 WDM 技术可以提高系统的传输速率^[23-24]。目前最新的研究成果中,Li 等^[25]提出了可见光传输系统中基于 RGB-LED 的集成接收机和硅 PIN 二极管探测器阵列,采用最大合并比(MRC)算法和 16QAM-OFDM 调制,基于市售的 RGB-LED 和集成 PIN 阵列的 4 个 PIN 单元,可实现传输距离为 30 cm、传输速率为 1.2 Gbit/s 的自由空间光传输。实验结果表明,多 PIN 二极管集成的系统性能优于单 PIN 二极管系统。系统结构和原理如图 8 所示。

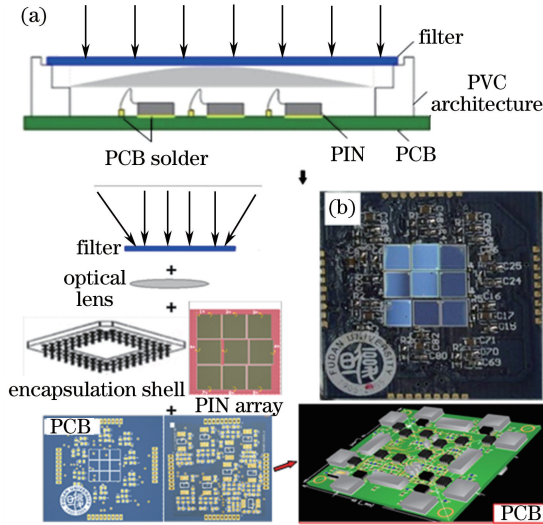


图 8 焦平面阵列集成 PIN。(a)结构示意图;(b)集成电路板实物图

Fig. 8 Focal plane array integrated PIN. (a) Structural diagram; (b) picture of integrated circuit plate

VLC 中使用的新型 LED 的光谱较窄^[26],该新型 LED 不包含任何磷光体层,并且由较低的正向电流供电。黄色分量响应大约需要 67 ns 甚至更多,因此传输速率被限制为 15 Mbit/s^[27-28]。由具有直接间隙(GaAlI₃、GaAlI₂P、AlGaIn、InGaIn 等)的材料制成的 LED 可以提供的最大传输速率为 622 Mbit/s^[29-30]。最近的研究中,Sun 等^[31]提出了一种新的氮化镓(GaN)LED 结构,这是对标准 GaN LED 外延的进一步改进,是一种可用于商业的 GaN LED 产品,该结构包括厚度为 300 nm 的铝掺杂氧化锌透明电流扩散层及外延生长层,具有较好的功率-电压($P-V$)线性度,并且适合于高传输速率的 VLC。在实验方面,具有台面直径为 150 μm 的单个 GaN 基蓝色 LED 可在 42 mW 的最大光功率条件下实现 3 Gbit/s 的传输速率,调制带宽可达到 600 MHz,证明了通过提高芯片级 $P-V$ 线性度可以增强 LED 的实用性和自由空间数据传输能力。

3 基于高速 VLC 关键技术的实验研究

利用前文所述的技术,采用基于 VLC 系统的红绿蓝黄(RGBY)LED 的实验装置、级联的桥 T 型预加权电路和基于 MRC 算法的差分接收器进行实验,实验装置示意图如图 9 所示。在使用电放大器(EA)对信号进行放大之前,先利用级联 T 桥预加重电路对信号进行处理,然后将数据耦合进入直流电流,相邻 RGBY LED 的距离为 1 m。两个透镜用来将经过整形后的光传送到规则的光学锥体和光学 R/G/B/Y 过滤器,以实现不同颜色光的选择和过滤,之后使用两个 PIN 来检测光信号,PIN 将光信号转换为电流信号,电流信号进入差分输出跨阻放大器(TIA)后被放大。实验中进行了上采样处理,并利用任意波形发生器(AWG)产生驱动信号,采样率为 1.8 GSa/s,数字实时示波器(OSC)的采样率为 2 GSa/s,调制带宽为 600 MHz。通过离线数字信号处理来解调 OSC 采样得到的信号^[32]。图 9 为高速 VLC 系统实验装置示意图,RX₁、RX₂ 为接收到的两路信号。

该 VLC 系统使用了级联的预均衡电路和两个输出微分的 PIN 接收机,接收机采用基于 MRC 算法的差分接收器可达到比较好的效果。MRC 算法可将单独接收的信号线性组合起来,以便最大程度地提升瞬时输出信

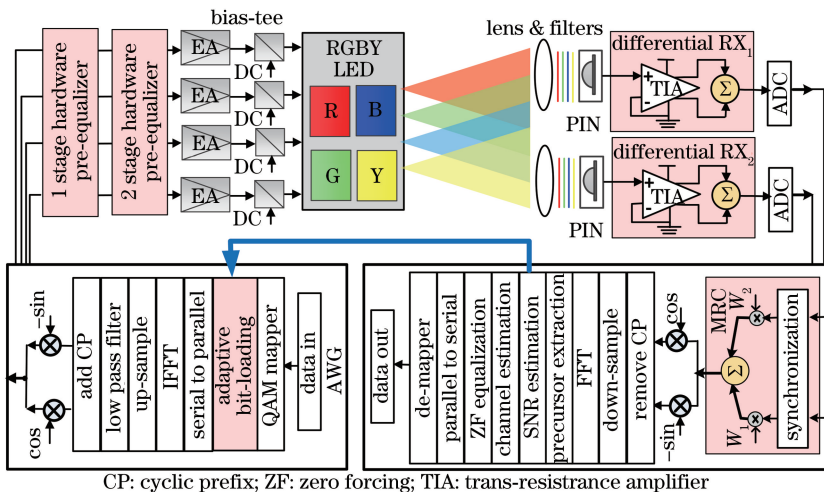


图 9 高速 VLC 系统实验装置示意图

Fig. 9 Experimental setup diagram of high speed VLC system

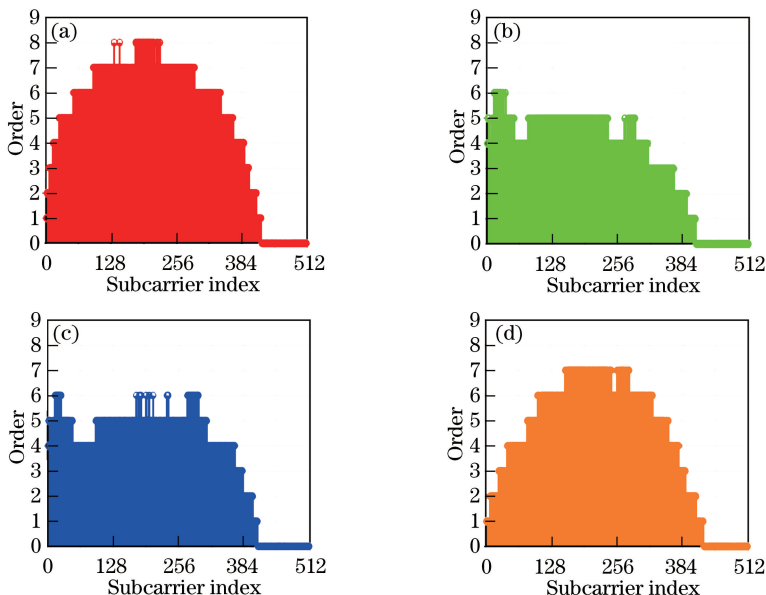


图 10 在不同颜色的可见光情况下子载波的比特加载量。(a)红光;(b)绿光;(c)蓝光;(d)黄光

Fig. 10 Bit loadings of different subcarriers of visible lights with different colors. (a) Red light; (b) green light; (c) blue light; (d) yellow light

号的信噪比,因此输出的结果为不同衰落信道的加权。该 VLC 系统的传输距离为 1 m,通过测量信噪比来自适应分配调制阶数。进行信噪比估计之后,在红绿蓝黄 4 种颜色的可见光情况下,不同子载波的比特数加载情况如图 10(a)~(d)所示。分析得到红光的传输速率为 2.8699 Gbit/s,绿光的传输速率为 2.004 Gbit/s,蓝光的传输速率为 2.1668 Gbit/s,黄光的传输速率为 2.4727 Gbit/s,总的传输速率为 9.51 Gbit/s。

4 结束语

VLC 于 2000 年被提出,经过 10 年的快速发展,其传输速率已经从最初的 1000 kbit/s 达到了目前的 9.5 Gbit/s。目前,VLC 存在三个明显的问题:

1) LED 发射器的带宽有限。由于白光 LED 设计的初衷是用于照明而非通信,所以其调制带宽非常有限。特别对于目前市场上主流的照明产品(蓝光激发黄色荧光粉类型的白光 LED)而言,响应缓慢的荧光粉会限制其带宽。目前市场上主流白光 LED 的 10 dB 带宽都不到 20 MHz,严重影响了 VLC 系统容量的提升。

2) 硅基光电接收器的敏感性较低。目前 VLC 系统普遍采用的硅基探测器主要对红外波段比较敏感,

其响应速度峰值在红外波段,而蓝光波段的响应速度只有红外的 1/4 左右。

3) 非线性失真。由于光电二极管传递曲线呈非线性,同时 LED 的频域响应也呈非线性,因此如何对非线性失真进行补偿也是亟待解决的问题。

今后的研究中,还需要针对以上几个问题进行深入研究,才可能突破 VLC 系统现有的速率瓶颈。在 VLC 系统的实用化过程中,可见光组网和专用可见光集成芯片是未来限制 VLC 技术实用化的重要因素。随着可见光标准和可见光集成芯片水平的发展,VLC 技术的实用化也将不再遥远。

VLC 技术正处于高速蓬勃发展期,各国研究者在过去约 10 年间不断突破技术瓶颈,VLC 技术从实验室走向产业化的前景已经越来越明朗。随着白炽灯、荧光灯逐渐退出市场并被 LED 光源取代,未来任何有光的地方都可以成为潜在的可见光无线通信数据传输源。在信息量呈指数增长的今天,巨大的全球信息传输需求将推动超高速通信不断快速发展,也许不久的将来,VLC 会像今天的无线保真技术一样,成为通信技术的有益补充。

参 考 文 献

- [1] Tanaka Y, Haruyama S, Nakagawa M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [C]. The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000: 6866645.
- [2] Conti J P. What you see is what you send[J]. Engineering & Technology, 2008, 11: 66-67.
- [3] Kottke C, Habel K, Grobe L, *et al.* Single-channel wireless transmission at 806 Mbit/s using a white-light LED and a PIN-based receiver[C]. 14th IEEE International Conference on Transparent Optical Networks, 2012: 12908328.
- [4] Khalid A M, Cossu G, Corsini R, *et al.* 1-Gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1465-1473.
- [5] Le Minh H, O'Brien D, Faulkner G, *et al.* 100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(15): 1063-1065.
- [6] Azhar A H, Tran T A, O'Brien D. Demonstration of high-speed data transmission using MIMO-OFDM visible light communications[C]. IEEE Globecom Workshops, 2010: 11774503.
- [7] Vucic J, Kottke C, Habel K, *et al.* 803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011: OWB6.
- [8] Azhar A H, Tran T A, O'Brien D. Demonstration of high-speed data transmission using MIMO-OFDM visible light communications[C]. IEEE Globecom Workshops, 2010: 11774503 .
- [9] Haigh P A, Chvojka P, Zvanovec S, *et al.* Experimental verification of visible light communications based on multi-band CAP modulation[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2015: Tu2G.2.
- [10] Wu F M, Lin C T, Wei C C, *et al.* 3.22-Gb/s WDM visible light communication of a single RGB LED employing carrier-less amplitude and phase modulation[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2013: OTh1G.4.
- [11] Wang Y, Tao L, Huang X, *et al.* 8-Gb/s RGBY LED-based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 15568083.
- [12] Wu F M, Lin C T, Wei C C, *et al.* 1.1-Gb/s white-LED-based visible light communication employing carrier-less amplitude and phase modulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(19): 1730-1732.
- [13] Wang Y, Tao L, Wang Y, *et al.* High speed WDM VLC system based on multi-band CAP64 with weighted pre-equalization and modified CMMA based post-equalization [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(10): 1719-1722.
- [14] Wang Y, Tao L, Huang X, *et al.* Enhanced performance of a high-speed WDM CAP64 VLC system employing Volterra series-based nonlinear equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 7901907.
- [15] Wang Y, Huang X, Tao L, *et al.* 1.8-Gb/s WDM visible light communication over 50-meter outdoor free space transmission employing CAP modulation and receiver diversity technology[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2015: M2F.2.
- [16] Huang X, Chen S, Wang Z, *et al.* 2.0-Gb/s visible light link based on adaptive bit allocation OFDM of a single phosphorescent white LED[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 7904008.
- [17] Fujimoto N, Mochizuki H. 477 Mbit/s visible light transmission based on OOK-NRZ modulation using a single commercially available visible LED and a practical LED driver with a pre-emphasis circuit[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2013: 13581859.

- [18] Huang X, Shi J, Li J, *et al.* 750 Mbit/s visible light communications employing 64QAM-OFDM based on amplitude equalization circuit[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2015: Tu2G.1.
- [19] Huang X, Chen S, Wang Z, *et al.* 1.2 Gbit/s visible light transmission based on orthogonal frequency-division multiplexing using a phosphorescent white light-emitting diode and a pre-equalization circuit[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(10): 100602.
- [20] Chi Nan. Key devices and applications of LED visible light communication[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015: 8.
迟楠. LED VLC 关键器件与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 8.
- [21] Langer K D, Vucic J, Kottke C, *et al.* Advances and prospects in high-speed information broadcast using phosphorescent white-light LEDs[C]. 11th International Conference on Transparent Optical Networks, 2009: 10803391.
- [22] Le Minh H, O'Brien D, Faulkner G, *et al.* High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(14): 1243-1245.
- [23] Shrestha N, Sohail M, Viphamakit C, *et al.* Demonstration of visible light communications using RGB LEDs in an indoor environment[C]. International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology, 2010: 11390377.
- [24] Kottke C, Habel K, Grobe L, *et al.* Single-channel wireless transmission at 806 Mbit/s using a white-light LED and a PIN-based receiver[C]. 14th International Conference on Transparent Optical Networks, 2012: 12908328.
- [25] Li J H, Huang X X, Ji X M, *et al.* An integrated PIN-array receiver for visible light communication[J]. Journal of Optics, 2015, 17(10): 105805.
- [26] Vitasek J, Vasinek V, Latal J, *et al.* Visible light communications with compound spectra[J]. Optics Communications, 2016, 363: 63-68.
- [27] Vitta P, Pobedinskas P, Zukauskas A. Phosphor thermometry in white light-emitting diodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(6): 399-401.
- [28] Shionoya S, Yen W M, Yamamoto H. Phosphor handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006: 978.
- [29] Held G. Introduction to light emitting diode technology and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 192.
- [30] Schubert E F, Gessmann T, Kim J K. Light emitting diodes[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 434.
- [31] Sun Z, Teng D, Liu L, *et al.* A power-type single GaN-based blue LED with improved linearity for 3 Gb/s free-space VLC without pre-equalization[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 7904308.
- [32] Chi N, Shi J, Zhou Y, *et al.* High speed LED based visible light communication for 5 G wireless backhaul[C]. Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2016: 16263477.