

基于硬件预均衡电路的高速可见光通信系统

迟楠, 周盈君, 赵嘉琦, 黄星星

复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433

摘要 可见光通信(VLC)是一种新型无线光通信技术,它将照明和通信结合起来,因此具有极其广阔的应用前景,成为近年来研究的热点。目前VLC发展的主要瓶颈在于,LED有限的调制带宽限制了VLC系统的传输速率。为解决这一问题,可见光通信系统中使用了硬件预均衡电路,设计并使用了单双级联桥T幅度均衡器,结合自适应比特功率加载正交频分复用(OFDM)技术,有效地提高了可见光通信系统的调制带宽和传输速率。

关键词 可见光通信;硬件预均衡;正交频分复用

LED具有诸多优点,例如:高亮度、寿命长、低成本、低功耗和高保密性等。这些优点使其成为公认的下一代照明设备。与此同时,基于LED的可见光通信(VLC)系统因其具备未受管制的频谱、无电磁干扰、高保密性等优点而成为近年来的研究热点。商用白光LED的调制带宽都低于10 MHz,因而极大地限制了VLC系统的传输速率^[1-2]。利用蓝光滤镜、预均衡和后均衡等方法可以提升商用LED的调制带宽,从而提升数据传输速率。预均衡电路可以用来提升高频响应、降低低频响应。在2008年基于OOK-NRZ的多谐振均衡实现了荧光粉白光LED的80 Mbit/s数据传输,但通信距离只有10 cm^[1]。2014年,Nobuhiro Fujimoto和Shohei Yamamoto实现了基于预均衡、后均衡的红、绿、蓝(RGB)LED蓝光芯片的15 cm、662 Mbit/s OOK传输^[3]。同年,实现了基于模拟预加重和后均衡电路的商用荧光粉白光LED的60 cm、550 Mbit/s的OOK传输。

正交频分复用调制(OFDM)、离散多音(DMT)、无载波幅相调制(CAP)和单载波频域均衡(SC-FDE)等技术的应用均可大幅提升数据传输速率。通过结合正交振幅(QAM)和波分多路复用(WDM),可实现基于RGB LED的OFDM 575 Mbit/s^[4]和2.5 Gbit/s^[5]的数据传输、DMT 3.4 Gbit/s^[2]和5.6 Gbit/s^[6]的传输、SC-FDE 4.22 Gbit/s的数据传输^[7]、CAP 4.5 Gbit/s的数据传输^[8]。荧光粉白光LED相较于RGB LED而言具有更低的复杂性和成本,因而在照明方面更受欢迎。文献[9]和[10]中实现了使用预均衡电路无蓝光滤镜190 Mbit/s的0.75 m自由空间传输和使用蓝光滤镜无预均衡电路185 Mbit/s的0.8 m自由空间传输。文献[4]中实现了商用荧光粉

白光LED 225 Mbit/s的数据传输。文献[11]中实现了基于自适应比特功率加载DMT调制的10 cm、1 Gbit/s的商用荧光粉白光LED可见光数据传输。文献[12]使用蓝光GaN μ LED和黄色荧光聚合物发射的白光实现了3 cm的1.68 Gbit/s数据传输。这个实验使用了一种特殊设计的微结构LED,这种LED的带宽比商业LED宽很多。

本文提出了一种桥T幅度均衡器,并使用商用红光LED和APD接收机实现了64QAM-OFDM 750 Mbit/s^[13]的数据传输。之后,通过使用双级联桥T幅度均衡器实现了基于商用荧光粉白光LED和16QAM-OFDM的1 m、1.6 Gbit/s^[14]的可见光传输。进一步使用单级联桥T幅度均衡器和自适应比特功率加载OFDM实现了1.5 m、2 Gbit/s^[15]的商用荧光粉白光LED可见光通信传输。这是目前所知的使用单个商用荧光粉白光LED进行可见光通信传输可以达到的最高速率。

1 单级联桥T幅度均衡器和OFDM

提出并使用了一种桥T幅度均衡器,该均衡器适用于高速VLC系统。通过采用预均衡电路、商用红光LED和APD光探测器,该系统可用调制带宽可达125 MHz。经过2 m自由空间的传输后,利用64QAM-OFDM调制方式使传输速率达到750 Mbit/s,并且误码率低于前向纠错码率的极限 3.8×10^{-3} 。

图1是在VLC系统中使用的桥T幅度均衡器框图。在该均衡器中 Z_{11} 是由电阻 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} 是由电阻 R_4 、电容 C_2 和电感 L_2 组成的RLC网络2的等效阻抗,电路中的电阻 R_2 和 R_3 都等于 R_0 。

收稿日期:2016-06-30;修回日期:2016-07-26

基金项目:广东省科技计划项目(2014B010119003)

作者简介:迟楠,教授,研究方向为高速光通信,电子邮箱:nanchi@fudan.edu.cn

引用格式:迟楠,周盈君,赵嘉琦,等.基于硬件预均衡电路的高速可见光通信系统[J].科技导报,2016,34(16):144-149;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.018

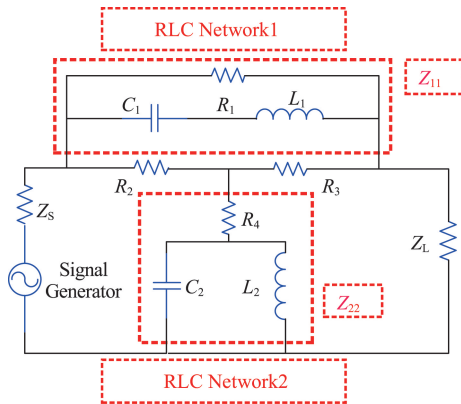


图1 桥T幅度均衡器原理

Fig. 1 Schematic diagram of bridged-T amplitude equalizer

对这个实验的VLC系统来说, R_0 为 50Ω , 其数学表达式为

$$Z_{11} \times Z_{22} = R_2 \times R_3 = R_0^2 \quad (1)$$

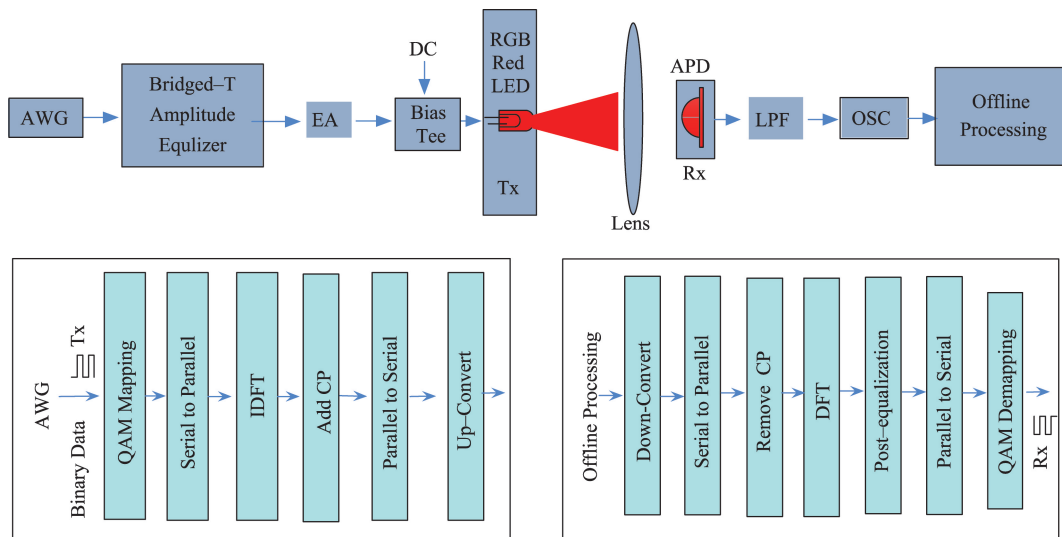
$$S_{21} = \frac{1}{1 + \frac{R_L}{R_4 + \frac{j\omega L_1}{1 - \omega^2 C_1 L_1}}} \quad (2)$$

$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{C_1 L_1} \quad (3)$$

为使式(1)对任意 ω 都成立且能与信号发生器和LED驱动电路间的均衡器实现阻抗匹配, 该网络的前向增益响应 S_{21} 应满足式(2)。 Z_s 是信号发生器的输出阻抗, Z_L 是LED驱动电路的输入阻抗, 它们的值均等于 R_0 。根据式(2), 当 $1 - \omega^2 C_1 L_1$ 趋于0, S_{21} 可趋于最大值1, 且均衡带宽取决于 f_0 。

在均衡器的实际使用中, 电阻、电容和电感的取值都取决于实验中需要用到的器件。实验中, 这些参数的值被设为: $R_1=249 \Omega$, $R_2=R_3=49.9 \Omega$, $R_4=10 \Omega$, $C_1=C_2=22 \text{ pF}$, $L_1=L_2=56 \text{ nH}$ 。

图2为VLC系统的原理框图, 图3为实验装置。该研究中, AWG(Tektronix AWG710)输出的驱动信号被所设计的幅度均衡器均衡。再经过电放大器(Minicircuit, 25 dB增益, 50 W输入阻抗和50 W输出阻抗)放大之后, 所得到的波形经过偏置器进行交直流耦合, 加载到红光LED上。接收端采用APD(Hamamatsu APD, -3 dB带宽为100 MHz)接收光信号, 同时在接收端APD之前采用棱镜进行聚光以提高系统的信噪比(SNR), 然后采用蓝色滤光镜滤除白光中的黄色荧光粉部分, 之后APD输出数据由实时数字示波器(OSC, Agilent 54855A)



LPF为低通滤波器, EA为电放大器, DC为直流, APD为雪崩二极管, OSC为实时示波器, AWG为任意波形发生器

图2 可见光通信系统

Fig. 2 Block diagrams of VLC system

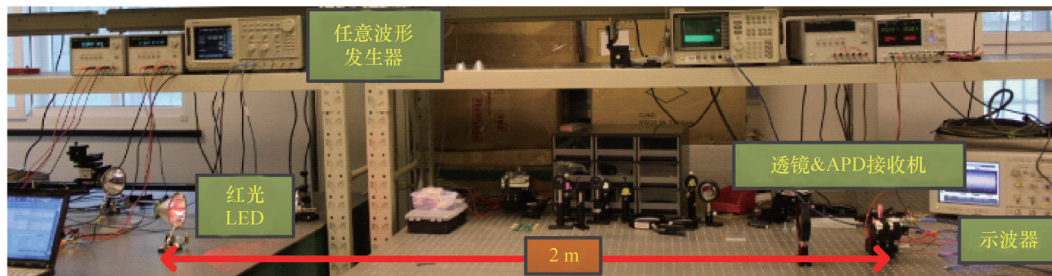


图3 采用桥T幅度均衡器的VLC实验装置

Fig. 3 Experimental setup of VLC system with bridged-T amplitude equalizer

采集数据。

图4为测得的电谱图,其中LED和APD的距离为2.0 m。从图4可以看到,采用均衡器之后,低频部分功率衰减,而高频部分则相对提高。图5展示了根据实验测得的误码率随信号驱动电压、偏置电流和调制带宽的改变而发生的变

化。此时,LED和接收机间的距离固定为2 m。由图5可以看出,VLC系统的性能可以通过使用联桥T幅度均衡器显著提升。利用了均衡器后,得到的误码率低于前向纠错码率的极限 3.8×10^{-3} 。

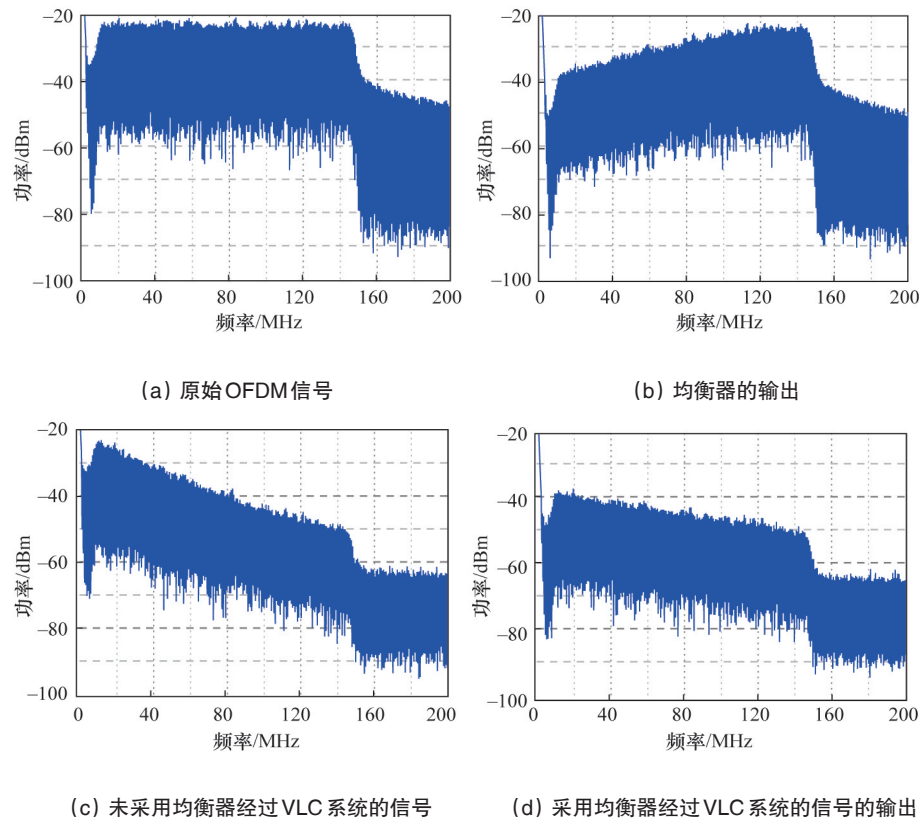


图4 电谱图

Fig. 4 Electrical spectra

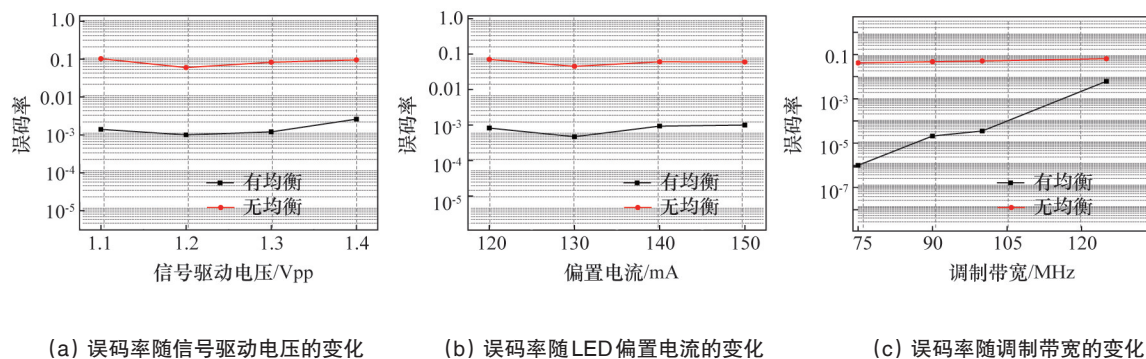


图5 误码率测试结果

Fig. 5 BER results

2 双级联桥T幅度均衡器和OFDM

提出了一种双级联桥T幅度均衡器,该均衡器适用于高速可见光通信(VLC)系统。图6为在VLC系统中使用的双级

联对称T型幅度均衡器框图,该电路是两个T型均衡器级联。

图7展示了本实验采用白光LED和差分接收PIN接收器的系统框图。图8展示了基于该系统的实验装置,单个白光

LED发射信号,接收器采用差分输出。图9展示了根据实验测得的误码率随偏置电压和调制带宽的改变而发生的变化。由图9可以看出,VLC系统的性能可以通过使用双级联桥T幅度均衡器显著提升。通过采用该预均衡电路、商用的白光LED、蓝光滤波和差分接收探测器PIN,可见光通信系统

的-3 dB带宽可以从17 MHz扩展到366 MHz。该系统可用调制带宽可以达到400 MHz,在经过100 cm的自由空间传输后,利用16QAM-OFDM调制方式可使速率达到1.6 Gbit/s,在经过200 cm空间传输后,采用QPSK-OFDM可以使速率达到0.7 Gbit/s,并且误码率低于前向纠错码的极限 3.8×10^{-3} 。

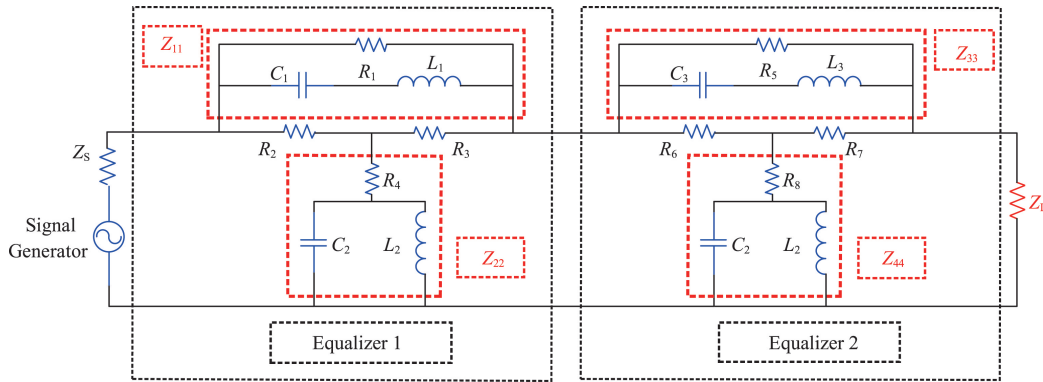


图6 双级联桥T均衡器原理

Fig. 6 Schematic diagram of two cascaded bridged-T amplitude equalizer

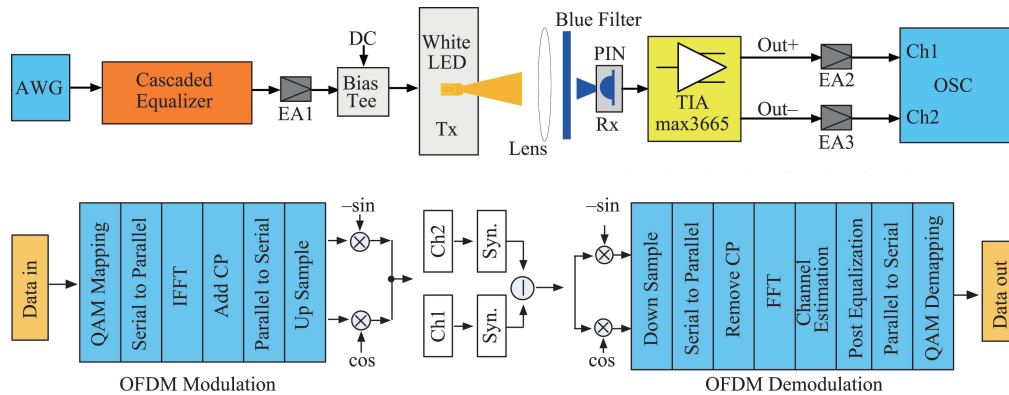


图7 可见光通信系统

Fig. 7 Block diagrams of VLC system



图8 采用双级联双级联桥T均衡器的白光VLC实验装置

Fig. 8 Experimental setup of VLC system with two cascaded bridged-T amplitude equalizer

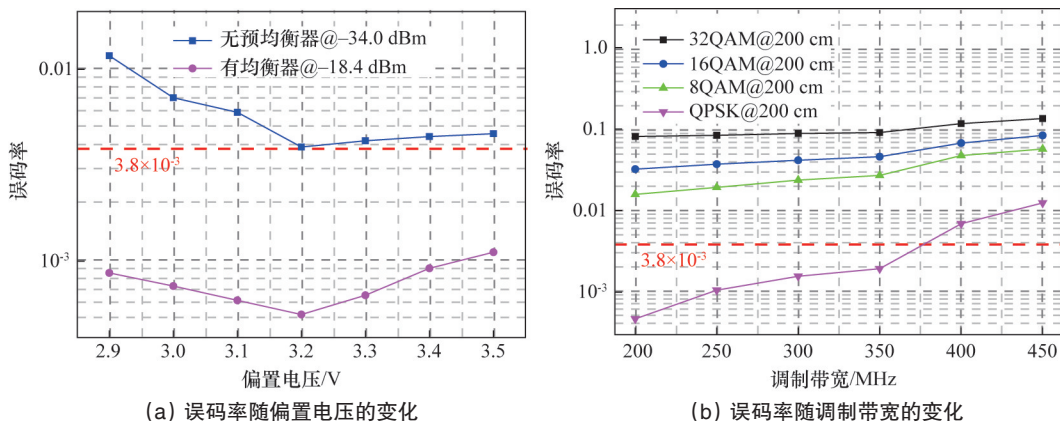


图9 BER测试结果

Fig. 9 BER measurement results

3 单级联桥T幅度均衡器和自适应比特功率加载OFDM

图10为建立的基于商用荧光粉白光LED的高速可见光通信系统示意。在这个系统中,利用预均衡电路来扩展调制带宽,并采用接收机用于降低系统的噪声。此外,系统采用自适应比特功率加载OFDM调制,可以充分利用可见光通信强衰落信道。图11展示了根据实验测得的误码率随速率和距离的改变而发生的变化。误码率随着数据速率和传输速

率的提升而增加。实验验证了在经过1.5 m的自由空间传输后,系统经过去循环前缀、训练信息和前向纠错码之后,系统最终传输速率可以达到2 Gbit/s,得到的误码率低于前向纠错码率的极限 3.8×10^{-3} 。经过3 m自由空间传输之后,速率仍然可以达到0.79 Gbit/s。这是目前使用商用荧光粉白光LED下能达到的最高速率,该传输距离和传输速率都已经超过目前国际其他采用商用荧光粉白光LED发表的成果。

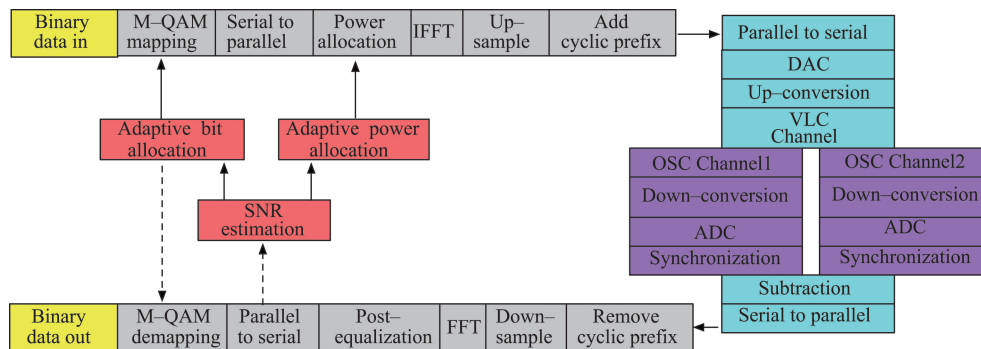


图10 采用自适应比特和功率分配的OFDM系统

Fig. 10 Block diagram of implementing adaptive bit and power loading OFDM

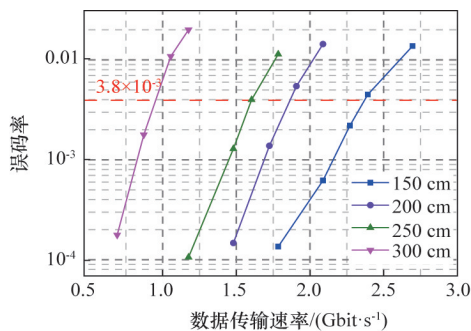


图11 不同速率和距离下的BER

Fig. 11 BERs at different data rates and distances

4 结论

研究针对可见光通信系统的调制带宽低问题,设计并使用了单双级联桥T幅度均衡器,结合自适应比特功率加载正交频分复用(OFDM)技术,有效地提高了可见光通信系统的调制带宽,实现了可见光通信系统高速率传输。介绍了单级联桥T幅度均衡器和OFDM、双级联桥T幅度均衡器和OFDM和单级联桥T幅度均衡器自适应比特功率加载OFDM 3个实验,验证了硬件预均衡电路在提升VLC系统传输速率上的可行性。因此,使用硬件预均衡电路并结合先进的调制技术是实现高速VLC系统非常重要的途径。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] Cossu G, Khalid A M, Choudhury P, et al. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED[J]. Optics Express, 2012, 20(26): B501-B506.
- [3] Fujimoto N, Yamamoto S. The fastest visible light transmissions of 662 Mb/s by a blue LED, 600 Mb/s by a red LED, and 520 Mb/s by a green LED based on simple OOK-NRZ modulation of a commercially available RGB-type white LED using pre-emphasis and post-equalizing techniques[C]//2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC). Cannes: IEEE, 2014. Doi: 10.1109/ECOC.2014.6963895.
- [4] Wang Y, Wang Y, Chi N, et al. Demonstration of 575-Mb/s downlink and 225-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1203-1208.
- [5] Chi N, Wang Y, Wang Y, et al. Ultra-high-speed single red-green-blue light-emitting diode-based visible light communication system utilizing advanced modulation formats[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1): 22-25.
- [6] Cossu G, Wajahat A, Corsini R, et al. 5.6 Gb/s downlink and 1.5 Gb/s uplink optical wireless transmission at indoor distance (1.5 m)[C]//2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC). Cannes: IEEE, 2014: 1-3.
- [7] Wang Y, Huang X, Zhang J, et al. Enhanced performance of visible light communication employing 512-QAM N-SC-FDE and DD-LMS[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15328-15334.
- [8] Wang Y, Huang X, Tao L, et al. 4.5-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing CAP modulation and RLS based adaptive equalization[J]. Optics Express, 2015, 23(10): 13626-13633.
- [9] Yeh C H, Chow C W, Chen H Y, et al. Adaptive 84.44-190 Mbit/s phosphor-LED wireless communication utilizing no blue filter at practical transmission distance[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9783-9788.
- [10] Yeh C H, Chow C W, Liu Y L, et al. Investigation of no analogue-equalization and blue filter for 185 Mbps phosphor-LED wireless communication[J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(7): 1991-1997.
- [11] 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.
- [12] Chun H, Manousiadis P, Rajbhandari S, et al. Visible light communication using a blue GaN LED and fluorescent polymer color converter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2035-2038.
- [13] Huang X, Shi J, Li J, et al. 750Mbit/s visible light communications employing 64QAM-OFDM based on amplitude equalization circuit[C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, California: Optical Society of America, 2015: Tu2G. 1.
- [14] Huang X, Wang Z, Shi J, et al. 1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22034-22042.
- [15] 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): 1-8.

High speed visible light communication based on hardware pre-equalization circuit

CHI Nan, ZHOU Yingjun, ZHAO Jiaqi, HUANG Xingxing

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

Abstract Visible light communication (VLC) is an emerging wireless optical communication technology, which combines illumination and communication. So it has a broad application prospect that makes it a research hotspot in recent years. The main challenge of VLC's development is the limited modulation bandwidth of LED, which leads to a limited transmission rate of the VLC system. To solve this problem, hardware pre-equalization circuit is used in the VLC system. We design and use single and cascaded bridged-T amplitude equalizers. By combining the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology, the VLC system's modulation bandwidth and transmission rate can be improved efficiently.

Keywords visible light communication; hardware equalization; orthogonal frequency division multiplexing

(编辑 傅雪)