



室内可见光通信频域均衡技术 DSP 方法对比分析

摘要

对 3 种室内可见光通信传输技术的数字信号处理方法(DSP),包括正交频分复用(OFDM)、单载波频域均衡(SCFDE)与单载波频分复用(SCFDM)进行了对比分析.通过峰值功率比(PAPR)和计算复杂度比较了 3 种方法的优劣.分析结果表明,SCFDE 和 SCFDM 具有较低的 PAPR,但 SCFDM 计算复杂度较高.此外,还使用白光 LED 灯针对 3 种调制解调方法建立了实验模型.实验结果表明,在 VLC 传输系统中,由于低 PAPR 特性,使得 SCFDE 和 SCFDM 在误码率(BER)和 Q 值方面的性能优于 OFDM.

关键词

可见光通信;单载波频域均衡;单载波频分多址;正交频分复用;峰均值功率比

中图分类号 TN20

文献标志码 A

收稿日期 2017-02-08

资助项目 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

张士灏,女,硕士,研究方向为新一代无线通信技术.zhangsh@fjirsm.ac.cn

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

白光 LED 可用于照明与通信的特点,使得可见光通信(Visible Light Communication, VLC)技术成为近年来研究热点.VLC 与射频技术相比具有显著优势,如能源效率高、无需授权频谱、无 RF 干扰以及安全保密性高等^[1-5].结合以光信号为载波的空间传输模式,可见光通信(VLC)可开拓丰富的光谱资源,为新一代大容量移动通信的系统提供了解决方案.

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术具有传输效率高、有效对抗多径衰落、消除 ISI、信道利用率高等特点^[6],不但在射频领域得到了广泛的应用,而且也成为无线光通信研究领域高速通信的关键技术^[7-10].然而,在 OFDM 系统中复合包络是多个子载波信号的叠加,信号的包络变化剧烈,高峰均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)对驱动器的线性要求很高^[11].在室内可见光通信系统中,发射端光源 LED I-V 特性呈非线性,受数模转换器有限字长效应等限制,会对 OFDM 系统造成非常严重的影响.为了降低 PAPR,克服 OFDM 的峰均功率比值过大的问题,文献[12]提出了利用 SCFDE(单载波频域均衡)调制方法.除此之外,文献[13]提出的 SCFDM(单载波频分复用)也是一种高数据速率、高频谱利用率的无线传输方案.

目前,已经有较多文献对 OFDM、SCFDE 和 SCFDM 进行了分析研究^[12-15].然而,在室内 VLC 场景下,尚未见此类研究.此外,以往的研究是基于理想的加性高斯白噪声(AWGN)信道前提下的仿真分析,本文则通过仿真分析,比较 3 种数字信号处理(DSP)方法的 PAPR 以及计算复杂度,进而设置具体实验方案,对比分析了 3 种方法的实用性能.

1 PAPR 及计算复杂度性能分析

OFDM 符号是由多个独立的经过调制的子载波信号叠加而成的,当各个子载波相位相同或者相近时,叠加信号便会受到相同初始相位信号的调制,从而产生较大的瞬时功率峰值,由此带来较高的峰值平均功率比(PAPR),简称峰均比.峰均比超过某一给定门限值的概率,即互补累积分布函数(CCDF)是最常用来衡量 PAPR 的指标.本文基于 QPSK 星座映射,子载波数为 256,对 OFDM、SCFDM 和 SCFDE 系

¹ 中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究所,泉州,362200

统进行蒙特卡罗仿真其 CCDF 特性,结果如图 1 所示.对于 OFDM 系统而言,由于复合包络是多个子载波信号的叠加,不可避免地导致信号的包络变化剧烈,因此产生较大的 PAPR.在相同子载波情况下,SCFDE 与 OFDM、SCFDM 相比,有最低的 PAPR.发射端 SCFDM 的数字信号处理(DSP)过程同时含有傅里叶变换(FFT)和傅里叶反变换(IFFT),IFFT 的输出是大量正弦信号的叠加,因此导致 SCFDM 的 CCDF 比常规单载波信号的峰均比高,但是它的性能优于 OFDM.由此可见,SCFDE 和 SCFDM 在抑制 PAPR 方面较 OFDM 有更好的效果.

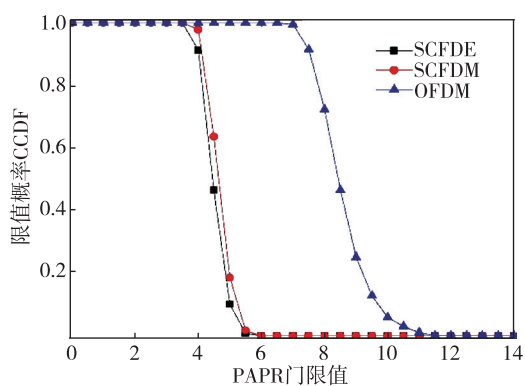


图 1 OFDM、SCFDE 和 SCFDM 的 CCDF 分析比较
Fig. 1 CCDF of PAPR comparison between OFDM, SCFDE, and SCFDM

假设系统子载波数为 M , OFDM、SCFDE 和 SCFDM 的计算复杂度分析比较结果如表 1 所示.由

表 1 OFDM、SCFDE、SCFDM 计算复杂度

Table 1 Computational complexity of OFDM, SCFDE, and SCFDM

DSP 方法	发送端		接收端		
	加法量	乘法量	加法量	乘法量	除法量
OFDM	$M \log_2 M$	$\frac{1}{2} M \log_2 M$	$M \log_2 M$	$\frac{1}{2} M \log_2 M$	M
SCFDE			$2M \log_2 M$	$M \log_2 M$	M
SCFDM	$2M \log_2 M$	$M \log_2 M$	$2M \log_2 M$	$M \log_2 M$	M

表 1 可以看出,OFDM 和 SCFDE 有相同的、较低的计算复杂度,有利于 LED 驱动器的上行传输.相比之下,SCFDM 具有最高的计算复杂度.对于典型值 $M=256$,OFDM(SCFDE) 和 SCFDM 系统乘法除法运算量分别为 2 304 和 4 352.相对于 SCFDM,OFDM 和 SCFDE 的系统复杂度为其 52.9%.

2 实验建立与结果分析

为了进一步考察 3 种系统在室内 VLC 场景下的数据传输性能,本文进行了具体实验验证,实验装置如图 2 所示.

在发射端,OFDM、SCFDE 和 SCFDM 基带信号进行 3 次上采样并转换成数字 $I-Q$ 调制.总子载波数为 1 024,其中 724 子载波用于数据传输,循环前缀(CP)和循环后缀(CS)的大小为 16.生成的波形上传至任意波形发生器(AWG),设采样率为 5 MS/s,利用 Bias Tee 结合电信号与直流(DC)信息,发射机采用市售的磷光白光 LED(Cree XLamp xhp50)作为光源,LED 调制带宽小于 10 MHz,LED 的 $I-P$ (电流-功率)特性曲线如图 3 所示.接收端利用商用硅固定放大检测器 Thorlabs PDA10A 将光信号转换为电信号.检测器的输出信号由实时数字示波器记录,采样信号进行离线解码.

图 4 和图 5 分别为 OFDM、SCFDE 和 SCFDM 的误码率(BER)、 Q 因子与传输距离之间的关系.该试验基于 QPSK 星座映射.实验结果表明,SCFDE 系统具有最佳的传输性能,OFDM 的传输性能最差.出现这种现象的原因是,OFDM 具有高的 PAPR,因瞬时光功率峰值而引起较强的非线性损坏.由图 5 可以看出,随着距离的增加, Q 值越来越低.

3 结束语

本文基于室内 VLC 系统,在 LED 的非线性特性和无线光信道色散性质下,对 OFDM、SCFDE 和 SCFDM 3 种技术性能进行了对比分析,仿真结果表

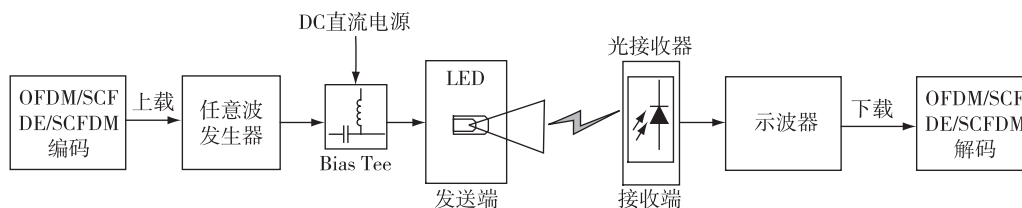


图 2 可见光通信 3 种不同 DSP 系统实验模型

Fig. 2 Experiment setup for three different DSP schemes based visible light communications

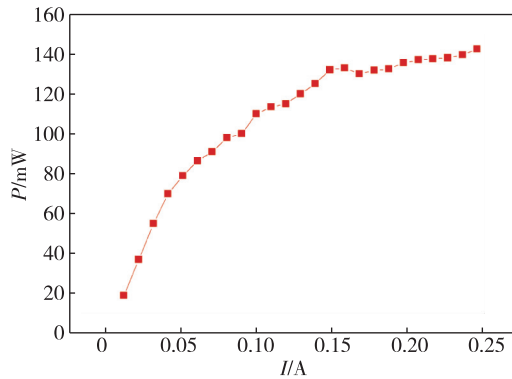


图3 LED 电流功率特性曲线

Fig. 3 The current-power characteristics of the LED

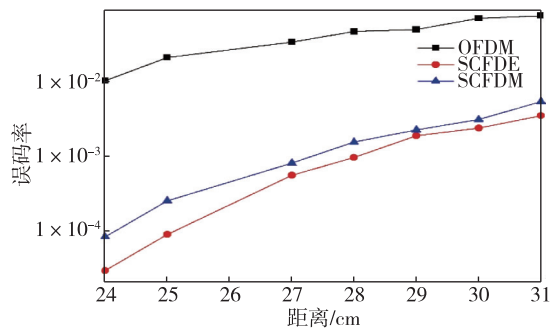


图4 BER 与接收距离之间的关系

Fig. 4 BER vs. received distance of the three techniques

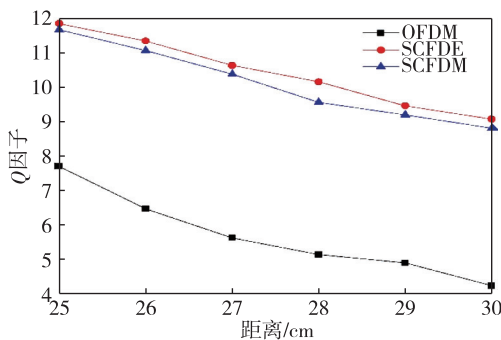


图5 Q 因子与接收距离之间的关系

Fig. 5 Q factor vs. received distance of the three techniques

明,发射端 SCFDE 系统具有低的 PAPR 和复杂性,有利于实现传输.OFDM 的计算复杂度与 SCFDE 相等,但具有最高的峰均比,受传输系统非线性影响较大,导致较高的误码率.SCFDM 较 OFDM 有更低的 PAPR,BER 和 Q 因子的性能表现良好,可以较好地抑制 PAPR,降低非线性效应的影响,但是 VLC 传输过程中具有最高的计算复杂度.

参考文献

References

- [1] Kashani M A, Kavehrad M. On the performance of single- and multi-carrier modulation schemes for indoor visible light communication systems [J]. IEEE Global Communications Conference, 2015, 34 (3) : 2084-2089
- [2] Yang S H, Jeong E M, Kim D R, et al. Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication [J]. Electronics Letters, 2013, 49 (1) : 54-56
- [3] Ma X X, Lee K, Lee K. Appropriate modulation scheme for visible light communication systems considering illumination [J]. Electronics Letters, 2012, 48 (18) : 1137-1139
- [4] Huang X X, Wang Z X, Shi J Y, 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
- [5] Wang Y Q, Wang Y G, 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
- [6] Wang Z X, Yu C Y, Zhong W D, et al. Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems [J]. Optics Express, 2012, 20 (4) : 4564-4573
- [7] Kimura H, Asaka K, Nakamura H, et al. Energy efficient IM-DD OFDM-PON using dynamic SNR management and adaptive modulation [J]. Optics Express, 2014, 22 (2) : 1789-1795
- [8] Wang Y Q, Shao Y F, Shang H L, et al. 875 Mb/s asynchronous bi-directional 64QAM-OFDM SCM-WDM transmission over RGB-LED-based visible light communication system [C] // Optical Fiber Communication Conference, 2013: 1-3
- [9] Azhar A H, Tran T, O'Brien D. A Gigabit/s Indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25 (2) : 171-174
- [10] Tsonev D, Chun H, Rajbhandari S, et al. A 3 Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a Gallium Nitride [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26 (7) : 637-640
- [11] Elgala H, Mesleh R, Haas H. Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55 (3) : 1127-1134
- [12] Li H L, Chen X B, Guo J Q, et al. A 550 Mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light LED for Practical high-speed low-complexity application [J]. Optics Express, 2014, 22 (22) : 27203-27213
- [13] Wang Y G, Huang X 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
- [14] 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) : 501-506
- [15] Dang J, Zhang Z, Wu L. A novel receiver for ACO-OFDM in visible light communication [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(12) : 2320-2323

Comparison studies of DSP schemes with frequency domain equalization for visible light communication

ZHANG Shihao¹ TANG Xuan¹ LIN Bangjiang¹ ZHANG Min¹ LI Yiwei¹

¹ Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362200

Abstract In this paper, we investigate and compare the performance of three digital signal processing (DSP) based transmission technologies for indoor visible light communication (VLC). These schemes include orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), single carrier frequency domain equalization (SCFDE), and single-carrier frequency division multiplexing (SCFDM). Particularly, we analyze their peak-to-average power ratio (PAPR) and computational complexity for comparison. Our results indicate that SCFDE and SCFDM system have relatively low PAPR while SCFDM has the highest complexity. Besides, we present a hardware prototype for the three modulation methods using a white LED lamp. Experimental results show that, due to their low PAPR, SCFDE and SCFDM outperform OFDM in aspects of bit error rate (BER) and Q factor performances in VLC transmission.

Key words visible light communication; single carrier frequency domain equalization; single-carrier frequency division multiplexing; orthogonal frequency division multiplexing; peak to average power ratio