

基于 DCO-OFDM 水下可见光通信系统的预均衡技术

阎威龙^{1,2}, 李晓记^{1,2*}, 王俊华^{1,2}, 李燕龙^{1,2}, 杜卫海², 高天^{1,2}

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004; 2. 认知无线电与信息处理教育部重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对硬件预均衡技术和基于有限脉冲响应(FIR)滤波器的软件预均衡技术存在的问题, 提出了数字预加重的软件预均衡技术, 该技术根据发光二极管(LED)的频率响应参数针对性地补偿 LED 带宽, 并设计了一套直流偏置光-正交频分复用(DCO-OFDM)水下可见光通信系统作为实验测试平台。实验结果表明: 采用数字预加重技术后, LED 调制带宽由 7.8 MHz 提升到了 16 MHz, 且该技术实现复杂度低、灵活性强, 预均衡后的信号频谱更加平坦。

关键词: 水下可见光通信; 直流偏置光-正交频分复用; 发光二极管; 预均衡; 数字预加重

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)04-0012-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Pre-equalization technology based on DCO-OFDM underwater visible light communication system

YAN Weilong^{1,2}, LI Xiaojie^{1,2*}, WANG Junhua^{1,2}, LI Yanlong^{1,2}, DU Weihai², GAO Tian^{1,2}

(1. College of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Ministry of Education Key Lab of Cognitive Radio and Information Processing, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the problems of hardware pre equalization technology and software pre-equalization technology based on finite impulse response (FIR) filter, a digital pre-emphasis software pre-equalization technology is proposed. The technology compensates the LED bandwidth according to the frequency response parameters of light-emitting diode (LED), and designs a direct-current biased optical orthogonal frequency division multiplexing (DOC-OFDM) underwater visible light communication system as an experimental test platform. The experimental results show that the modulation bandwidth of LED is increased from 7.8 MHz to 16 MHz by using digital pre-emphasis technology, and the implementation complexity of this technology is low, the flexibility is strong, and the signal spectrum after pre-equalization is more flat.

Key words: underwater visible light communication; direct-current biased optical orthogonal frequency division multiplexing; light-emitting diode; pre-equalization; digital pre-emphasis

0 引言

在水下可见光通信系统中, 发光二极管(LED)较窄的调制带宽严重限制了系统的传输速率, 常使用预均衡技术来扩展 LED 的带宽。预均衡技术从实现层面

收稿日期: 2020-09-01。

基金项目: 国家自然科学基金(61761014)资助; 教育部第二批“新工科”研究与实践项目(E-XTYR20200653)资助; 教育部高等学校电子信息类教学指导委员会 2020 年度教学改革研究重点项目(2020-ZD-02)资助; 教育部产学研合作协同育人项目(201902180021, 202002078046)资助。

作者简介: 阎威龙(1996—), 男, 硕士生, 现就读于桂林电子科技大学信息与通信学院电子与通信工程专业, 主要从事水下可见光通信系统关键技术方面的研究工作。曾参与了“水下 LED 可见光成像 MIMO 通信关键技术研究”国家自然科学基金项目。

* 通信作者: 李晓记(E-mail: 46941917@qq.com)。



上可分为硬件预均衡和软件预均衡。硬件预均衡技术主要在发射端使用滤波器、谐振器等模拟电路对抗系统的非线性衰落, 但该技术的模拟电路存在无法灵活调节参数、实现难度大且易受电噪声干扰等问题; 而主流的软件预均衡技术则是通过设计有限冲激响应(FIR)滤波器来进行预均衡, 虽然该技术具有均衡效果好、自适应能力强等优势^[1], 但 FIR 滤波器的阶数与系统复杂度成正比, 若要获得较好的均衡效果就必须采用高阶的 FIR 滤波器, 其系统复杂度也会大大提高。

为此, 本文提出一种数字预加重的软件预均衡技术, 同时设计一套直流偏置光-正交频分复用(DCO-OFDM)水下可见光通信系统, 并基于该系统对不同预均衡技术进行测试。

1 预均衡技术

LED 的调制带宽是可见光通信系统信道容量和传输速率的决定因素^[2]。由于 LED 本身的非线性特性及制造工艺等因素的影响, 普通商用 LED 的带宽较小, 严重限制了可见光通信系统性能的提升, 因此常采用预均衡技术来抵消系统的部分非线性衰落, 以获得更大的调制带宽^[3]。

1.1 硬件预均衡

目前, 应用在可见光通信系统中的硬件预均衡方案有 5 种: 基于多路谐振的预均衡、基于桥 T 型幅度均衡器的预均衡、基于超前校正的预均衡、基于晶体管的预均衡以及基于改进的 Bias-T 的预均衡^[4]。本文主要介绍多路谐振预均衡方案和桥 T 型均衡器方案。

文献[4]提出了一种多路谐振补偿方案, 通过使用多条谐振频率不同的谐振电路共同实现预均衡。文献[9]测出某型号 LED 的等效电感为 330 nH、内部等效电阻为 0.9 Ω 后, 采用谐振驱动技术消除 LED 内部等效电感的影响, 从而使驱动电流最大化。文献[5]和文献[10]将定阻对称桥 T 型幅度均衡器应用于可见光通信系统中, 以实现 LED 调制带宽的扩展。与传统的桥 T 型幅度均衡器相比, 定阻对称桥 T 型幅度均衡器具有更好的线性度和阻抗匹配性能^[11]。

多路谐振预均衡方案和桥 T 型均衡器方案都是基于谐振电路实现的。前者需要用特殊方法测定 LED 的等效电感, 后者则需要对信号发生器和负载进行阻抗匹配, 这 2 种方案的实现都较为困难。硬件预均衡技术虽然能够增加 LED 的调制带宽, 但模拟电路存在不能灵活调节各个元件参数、预均衡效果较差和容易引入噪声等问题。

1.2 软件预均衡

软件预均衡可以避免上述硬件预均衡存在的问题, 主流的软件预均衡方案是 FIR 预均衡滤波器。文献[12]提出了一种软件预均衡方案来扩展 LED 的调制带宽, 并实现了 1 m 自由空间中 2.08 Gb/s 的传输速率。

软件预均衡技术能够明显改善系统的传输速率, 但是在实际设计中, 滤波器阶数与系统的复杂度成正比, 要获得较好的均衡效果就必须采用高阶的 FIR 滤波器, 其系统复杂度也会大大提高。因此, 需要选择合适的滤波器阶数来平衡均衡效果和复杂度的问题。预均衡技术优劣对比如表 1 所示。

2 数字预加重技术

针对硬件预均衡技术和基于 FIR 滤波器的软件

表 1 预均衡技术优劣情况对比

预均衡 方案名称	预均衡 类型	优点	缺点
多路路	硬件	提高信号功率	等效电感测定困难
桥 T 型均衡器	硬件	谐振频率可调	阻抗匹配困难
FIR 滤波器	软件	灵活且均衡效果好	系统复杂度高

预均衡技术存在的问题, 本文提出采用一种数字预加重技术来扩展 LED 的调制带宽。该方案在获取 LED 的频率响应参数后, 能够针对性地进行频谱补偿, 使得预均衡后信号频谱更加平坦; 此外, 该方案不使用模拟电路也无需设计复杂的 FIR 滤波器, 因此系统复杂度低, 实现较为容易。数字预加重技术的原理框图如图 1 所示。其中, X 为经过正交幅度调制(QAM)映射后的信号, $\tilde{X}$ 为经过数字预加重后的信号。

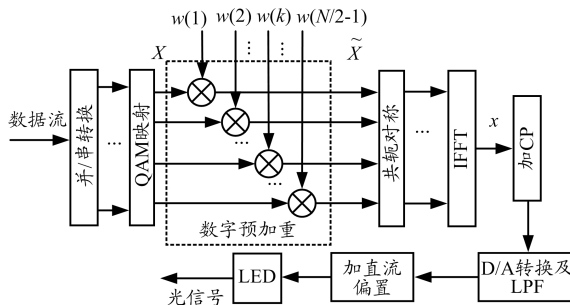


图 1 数字预加重技术原理框图

数字预加重的思路如下: 首先要获取 LED 的频率响应参数, 然后由频率响应参数计算出各子载波频率点的补偿系数, 最后根据补偿系数对各子载波频率点的幅值进行补偿以达到数字预加重的效果。

设使用矢量网络分析仪测量 LED 的频率响应参数为 $G(n)$, 第 n 点的频率 f_n 为:

$$f_n = f_{\min} + n \cdot f, n \in [1, \dots, M] \quad (1)$$

其中, $f_{\min}$ 为矢量网络分析仪的最低扫描频率, f 为矢量网络分析仪的扫描间隔, M 为矢量网络分析仪获取的频率点数。

对 $G(n)$ 进行插值以获取各子载波频率点处的频率响应参数 $g(k)$, 第 k 个子载波的频率 f_k 为:

$$f_k = \frac{B}{N} \cdot k, k \in \left[1, \dots, \frac{N}{2} - 1\right] \quad (2)$$

其中, B 为信号带宽, N 为 IFFT 点数。

由各子载波频率点处的频率响应参数 $g(k)$ 得出各子载波频率点处的补偿系数 $w(k)$ 为:

$$w(k) = -[g(k) - \max[g(k)]] \quad (3)$$

根据补偿系数 $w(k)$ 对 QAM 映射后的数据 $X(k)$ 进行补偿得出数字预加重后的数据 $\tilde{X}(k)$ 为:

$$\tilde{X}(k) = X(k) \cdot w(k) \quad (4)$$

3 DCO-OFDM 水下可见光通信系统

可见光 OFDM 调制是基于光强度调制实现的, 且 LED 具有非负特性, 驱动 LED 的信号应为非负实数。因此, 需对传统的 OFDM 信号进行处理, 常采用 DCO-OFDM 调制。在正交振幅调制(QAM)映射后对信号进行数字预加重, 然后通过共轭对称来对传统 OFDM 信号进行实数化处理, 最后加入 DCO 进行单极化处理。DCO-OFDM 调制技术框图如图 2 所示。

本文设计的 DCO-OFDM 水下可见光通信系统框图如图 3 所示。该系统主要包括发射机和接收机, 每个部分包含数字处理部分和模拟处理部分。发射机包括现场可编程逻辑阵列(FPGA)平台、数/模(D/A)转换模块、低通滤波器、功率放大器、Bias-Tee 偏置器、恒流源、1 W 绿色 LED 和 7°透镜; 接收机包括大曲率透镜、PIN 二极管、信号放大器、模/数(A/D)转换模块和 FPGA 平台。在发射端, FPGA 平台将 OFDM 基带数字信号传至 D/A 转换模块, 转换成 OFDM 基带模拟信号。信号经过低通滤波器后再由功率放大器放大信号的功率, 然后由 Bias-Tee 偏置器将信号与偏置电流耦合, 最后加载到 LED 发出光信号。接收端的大曲率透

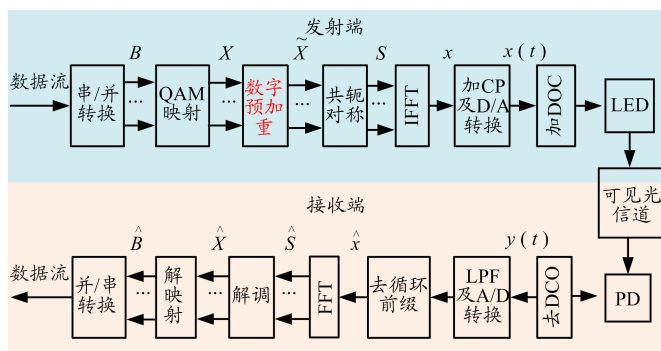


图 2 DCO-OFDM 调制技术框图

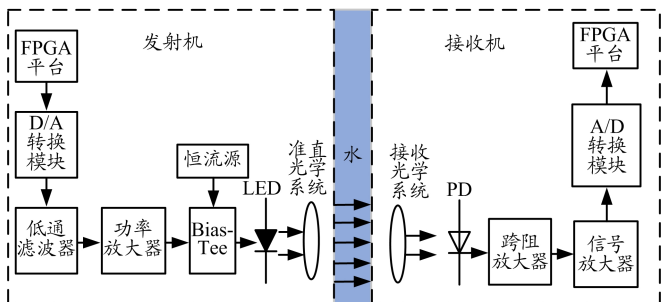


图 3 水下可见光通信系统框图

镜将光聚焦到 PIN 二极管的感光部位, 然后由 PIN 二极管、跨阻放大器及信号放大器共同实现电/光转换, 最后经过 A/D 转换模块后在 FPGA 平台中进行保存。DCO-OFDM 水下可见光通信系统收发机关键参数如表 2 所示。

表 2 DCO-OFDM 收发机关键参数

参数名称	参数值
LED 功率	1 W
功率放大器增益	26 dB
PIN 二极管接收面积	3.7 mm×3.7 mm
IFFT/FFT 点数	128
OFDM 符号数	16
D/A 分辨率	14 bit
A/D 分辨率	12 bit

4 实验结果

为验证不同 LED 带宽扩展技术的性能, 本文利用矢量信号发生器产生测试信号。实验系统结构如图 4 所示。信号由 2 条路径到达频谱分析仪: 路径 1 直接将矢量信号发生器与频谱分析仪连接, 用于观察原始信号的频谱; 路径 2 则是让信号通过水下可见光通信系统后再连接频谱分析仪, 用于观测通过水下信道后的信号频谱。

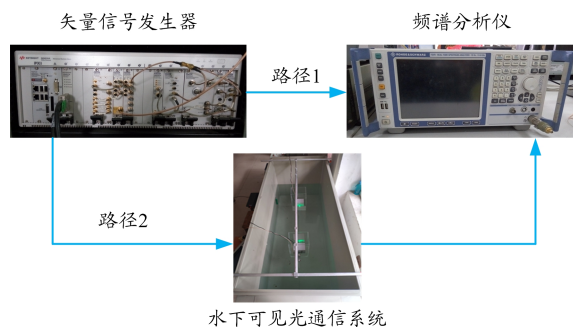
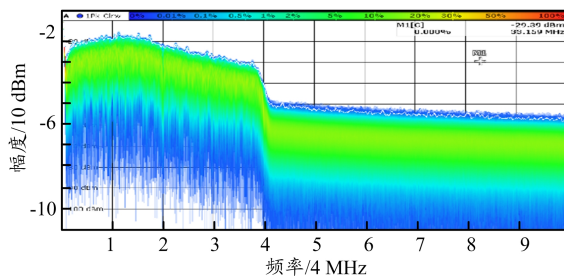
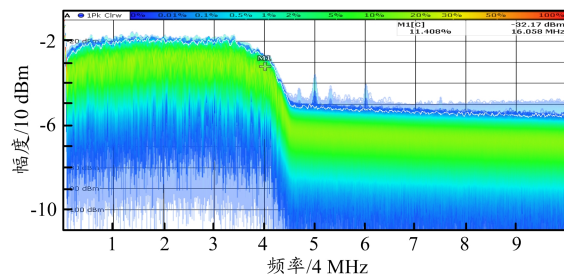


图 4 LED 带宽扩展技术测试实验系统

实验采用 128 个 IFFT 点数的 DCO-OFDM 水下可见光通信系统, 调制带宽为 16 MHz, 采样率为 48 MHz。LED 带宽扩展技术测试基于 DCO-OFDM 水下可见光通信系统, 水下环境为清水, 设定收发机的通信距离为 1 m, 调节发射机的增益, 使得接收机输出信号的峰峰值为 6 V, 测试结果如图 5 所示。图中白线表征频谱仪测量出的信号幅频曲线。从频谱补偿的效果来看, 图 5(a) 中, 经过桥 T 型均衡器和光信道的信号频谱在 8 MHz 范围内幅度接近 -20 dBm, 但在 8~16 MHz 范围内幅度明显低于 -20 dBm, 其幅频曲线在 16 MHz 范围内的落差较大; 图 5(b) 中, 经过数字预加重和光信道的信号频谱在 16 MHz 范围内幅值都接近 -20 dBm, 其幅频曲线在 16 MHz 范围内的落差较小, 即经过数字预加重的信号幅频曲线比经过桥 T 型均衡器的信号幅



(a) 经过桥 T 型均衡器和光信道的信号频谱



(b) 经过数字预加重和光信道的信号频谱

图 5 LED 带宽扩展技术测试结果

频曲线更加平坦。因此, 数字预加重技术的均衡效果比桥 T 型均衡器更加理想。

最后, 在基于 DCO-OFDM 的水下可见光通信系统中分别采用 4QAM、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM 和 128QAM 等 6 种 QAM 方式进行测试, 并且调节每次测试发射机的增益, 使得接收机输出信号的峰峰值为 6 V。实验获得不同 QAM 阶数的误比特率性能如图 6 所示。

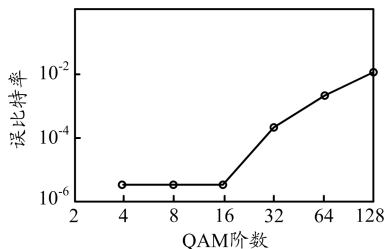


图 6 QAM 阶数对通信性能的影响

可以看出, 系统在采用 32QAM 时误比特率仍低于 10^{-3} , 在 64QAM 时误比特率高于 10^{-3} , 因此 32QAM 为系统能实现的最高调制阶数。当系统参数设为 32QAM、128 点的 IFFT 和 16 MHz 带宽时, 考虑循环前缀、帧头等损耗, 系统传输速率为 32 Mb/s。

5 结束语

为了解决由于 LED 调制带宽较窄, 极大限制水下可见光通信系统传输速率的问题, 本文提出了一种数字预加重的软件预均衡技术对 LED 的调制带宽进行

扩展, 将 LED 的调制带宽由 7.8 MHz 提升到了 16 MHz。最后在设计的 DCO-OFDM 水下可见光通信系统中进行了测试, 实现了清水环境下 1 m 距离时 32 Mb/s 的传输速率。相比于 FIR 预均衡滤波器和桥 T 型硬件均衡技术, 数字预加重技术无需设计高阶滤波器, 系统复杂度较低; 经过数字预加重技术补偿后的信号频谱更加平坦, 且可以避免模拟电路带来的各种问题, 容易实现。

参考文献:

- [1] 迟楠, 王超凡, 李韦萍, 等. 基于蓝绿光 LED 的水下可见光通信技术研究进展[J]. 复旦学报(自然科学版), 2019(5): 537-548.
- [2] 朱石超, 赵丽霞, 杨华. 适用于可见光通信的 LED 器件[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(6): 29-32.
- [3] 王玉峰, 曹凡, 邓震宇, 等. 可见光通信中 LED 非线性补偿和带宽拓展技术[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 25-36.
- [4] MINH HL, O'BRIEN D, FAULKNER G, et al. 80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED [C]//2008 34th European Conference on Optical Communication, September 21-25, 2008, Brussels, Belgium. Brussels: IEEE, 2008: 1-2.
- [5] 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.
- [6] 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 European Conference on Optical Communication, September 21-25, 2014, Cannes, France. Cannes: IEEE, 2014: 1-3.
- [7] LI H L, CHEN X B, GUO J Q, et al. An analog modulator for 460 Mb/s visible light data transmission based on OOK NRZ modulation [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 68-73.
- [8] 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.
- [9] MINH HL, O'BRIEN D, FAULKNER G, et al. High-speed visible light communications using multiple resonant equalization [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(13-16): 1243-1245.
- [10] HUANG X X, SHI J Y, LI J H, et al. A Gb/s VLC transmission using hardware preequalization circuit [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(18): 1915-1918.
- [11] 杜丽冰. 幅度均衡器[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1981.
- [12] ZHOU Y, LIANG S, CHEN S, et al. 2.08 Gbit/s visible light communication utilizing power exponential pre-equalization[C]//2016 25th Wireless and Optical Communication Conference, May 21-23, 2016, Chengdu, China. Chengdu: IEEE, 2016: 1-3.