



DOI: 10.12086/oe.2020.190671

## 可见光通信中 LED 非线性补偿和带宽拓展技术

王玉皞<sup>1</sup>, 曹凡<sup>1</sup>, 邓震宇<sup>1</sup>, 刘晓东<sup>2</sup>, 罗雨桑<sup>1</sup>, 马帅<sup>3</sup>, 鄢秋荣<sup>1\*</sup><sup>1</sup>南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330000;<sup>2</sup>武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072;<sup>3</sup>中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116

**摘要:** 可见光通信(VLC)是一项有前景的技术, 作为现有无线通信网络的有益补充, 可提供高速率、低延迟及多设备接入等通信服务。借助传统无线通信的高性能编码调制技术, 已经设计并实现了各种适配于 VLC 系统的物理层通信技术。不同于传统射频通信, VLC 采用 LED 作为信号的发射源, LED 的调制容易产生非线性失真且调制带宽有限, 已成为 VLC 高速通信的技术瓶颈。针对这两方面的挑战, 本文以白光 LED 为出发点, 阐述了白光 LED 能有效兼顾照明和通信的特性, 总结和分类了非线性失真补偿和拓展调制带宽的多种技术, 最后本文提出了 LED 封装材料及工艺、新型 Micro-LED 器件研究、光源布局设计、码间干扰消除技术等开放性研究问题, 以期提高可见光通信系统的性能。

**关键词:** 可见光通信; 白光 LED; 非线性失真补偿; 带宽拓展

**中图分类号:** TN929.1; TN364

**文献标志码:** A

**引用格式:** 王玉皞, 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): 190671

## LED nonlinearity compensation and bandwidth expansion techniques in visible light communication

Wang Yuhao<sup>1</sup>, Cao Fan<sup>1</sup>, Deng Zhenyu<sup>1</sup>, Liu Xiaodong<sup>2</sup>,Luo Yusang<sup>1</sup>, Ma Shuai<sup>3</sup>, Yan Qiurong<sup>1\*</sup><sup>1</sup>School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330000, China;<sup>2</sup>School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;<sup>3</sup>School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

**Abstract:** Visible light communication (VLC) is a promising technology that complements existing wireless communication networks to provide high-speed, low-latency, and multi-device access. With the high-performance code modulation technology of traditional wireless communication, various physical layer communication technologies adapted to VLC systems have been designed and implemented. Different from traditional radio frequency (RF) communication, VLC uses LED as the signal source. The modulation of LED is easy to produce nonlinear distortion and the modulation bandwidth is limited. It has become the technical bottleneck of VLC high-speed communication.

收稿日期: 2019-10-31; 收到修改稿日期: 2020-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61661028); 科技部重大专项项目(2018YF1404300); 江西省青年基金重大项目(20152ACB21008)

作者简介: 王玉皞(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事无线通信和传感网络的研究。E-mail: wangyuhao@ncu.edu.cn

通信作者: 鄢秋荣(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线通信系统的研究。E-mail: Yanqiurong@ncu.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

In view of the challenges of these two aspects, taking white LED as the starting point, this paper expounds that white LED can effectively balance the characteristics of illumination and communication, summarizes and classifies various techniques of nonlinear distortion compensation and extended modulation bandwidth. Finally, this paper proposes open research issues such as LED package materials and processes, new Micro-LED device research, light source layout design, and intercode interference cancellation technology are expected to improve the performance of visible light communication systems.

**Keywords:** visible light communication; white light emitting diode; nonlinear distortion compensation; bandwidth expansion

**Citation:** Wang Y H, Cao F, Deng Z Y, *et al.* LED nonlinearity compensation and bandwidth expansion techniques in visible light communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, **47**(3): 190671

## 1 引言

随着数据流量的爆发式增长以及传统通信网络中的频谱资源紧张,无线通信网络急需引入更高频谱效率的技术来支持高速率、低延迟和大规模联接的服务。得益于丰富且免监管的可见光频谱资源,可见光通信(visible light communication, VLC)被认为是一种有前景的技术支持高频谱效率,并成为学术界和工业界的研究热点<sup>[1-3]</sup>。具体而言,可见光通信是利用具备响应灵敏度和支持信号调制特性的发光二极管(light emitting diode, LED)在满足照明的同时提供高速通信服务的无线通信技术。与传统的无线射频(radio frequency, RF)通信技术相比, VLC 需使用光源发射器和检测器来完成光电信号的转换,即使用可见光频段,因此无电磁干扰;而可见光难以穿过障碍物,其安全性高,并能实现频率和空间的双重复用;利用现有的光源设施可以灵活快速部署,并支持射频信号难以覆盖的室内场所<sup>[4]</sup>。

鉴于 VLC 需要保证发射信号为非负实数,并保证照明需求,近年来研究人员设计并实现适配于 VLC 的信道编码、高速调制等物理层通信,已取得较大进展。2012年, Christoph 等人设计了以 RGB LED(red green blue)为发射机、PIN(positive intrinsic negative)光电二极管为接收机的可见光通信系统,并采用 DMT(discrete multi tone)调制技术,实现了单通道(红光)806 Mb/s的传输速率<sup>[5]</sup>。随着 VLC 进一步发展,2018年,迟楠等利用五基色 LED (RGBYC LED, red green blue yellow cyanogen)作为光源,并采用 64QAM-DMT (quadrature amplitude modulation-discrete multi-tone)调制技术,实现了 10.72 Gb/s 的传输速率<sup>[6]</sup>。上述的性能提升不仅得益于调制技术带来的速率增益,更是采用了性能更好的 LED 发射前端所带来的带宽增益,并

且在 VLC 系统中,限制其通信带宽的最大挑战就在于 LED 器件的特性。

通常, VLC 系统的设计要兼顾照明和通信性能,而白光 LED 具有长寿命、高照明效率、可集成度高等优点,能够提供高性能照明,并且由于白光 LED 优良的响应灵敏度和调制性能,能够获得更平坦的频响特性,为实现高速率高频谱效率的通信提供可能。得益于白光 LED 能有效地平衡照明和通信需求,使其成为 VLC 系统研究和设计的主流发射器件,而本文的研究正是基于白光 LED 进行展开<sup>[7]</sup>。具体而言,LED 具有非线性的电流-电压关系,当输入较大的信号幅度值时,会出现非线性失真,从而产生谐波和互调失真,使得系统中的误差矢量幅度(error vector magnitude, EVM)上升,导致通信系统的误码率恶化(bit error rate, BER)<sup>[8]</sup>。如图 1 所示,当电路中的直流偏置点变化较大时,发光二极管会表现出非线性,从而限制发射功率以及 VLC 系统信号的覆盖范围<sup>[9]</sup>;在正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)系统中,LED 允许通过的最大直流电流值会限制输入信号的幅度,系统具有较高峰均功率比(peak to average power ratio, PAPR)特性,使得 LED 表现出非线性,

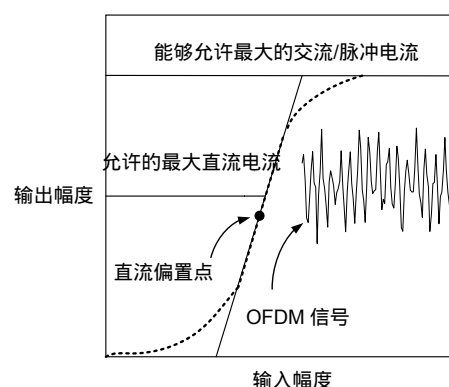


图 1 LED 非线性传输特性

Fig. 1 Nonlinear LED transfer characteristic

LED 的非线性会影响 OFDM 的信号导致带外辐射、带内失真、频谱效率降低等问题,降低系统的性能<sup>[10-11]</sup>。针对 LED 非线性失真问题,使用预失真技术可以有效避免 LED 在光电转换过程中产生的非线性失真<sup>[12]</sup>,还可以使用后失真技术来补偿 LED 非线性失真<sup>[13]</sup>。而由于 LED 是窄带特性,其支持信号调制的带宽有限,限制了整个通信系统的带宽。针对 LED 带宽有限问题,预均衡技术和后均衡技术可以拓展 LED 调制带宽<sup>[14]</sup>。因此本文从预失真技术和后失真技术的角度总结对比了补偿 LED 非线性失真的各类技术,以及从均衡技术角度总结对比了解决 LED 调制带宽有限的各类技术。

本文的章节安排为:第 2 部分介绍了白光 LED 器件,讲述了白光 LED 在可见光通信中的作用以及白光 LED 调制特性;第 3 部分介绍了白光 LED 非线性失真问题以及补偿技术;第 4 部分介绍了白光 LED 的带宽拓展技术;第 5 部分对文中提到的非线性失真问题和白光 LED 带宽调制的研究方案进行总结和展望。

## 2 白光 LED 器件

### 2.1 LED 可见光通信系统组成

LED 可见光通信是通过 LED 将电信号转换为光信号,并利用光电传感器进行信号接收的通信系统。可见光通信系统框图如图 2 所示,其通常由信号发射模块、信号接收模块以及自由空间信道三部分组成。

**发射模块:** 首先将原始数据流转换成二进制的比特流,然后经过预处理和编码,将编码数据进行信道调制,最后将调制信号转换为光信号并最终发射出去,其中发射端一般采用 LED 将电信号转换为光信号。值得注意的是,输入到 LED 的信号应该保证非负实数,并尽可能限制在 LED 的线性工作区。

**接收模块:** 光信号经过自由空间传输信道,到达可见光通信系统的接收端,接收端一般采用光电二极管将接收到的光信号转换成电信号,然后经过信号解

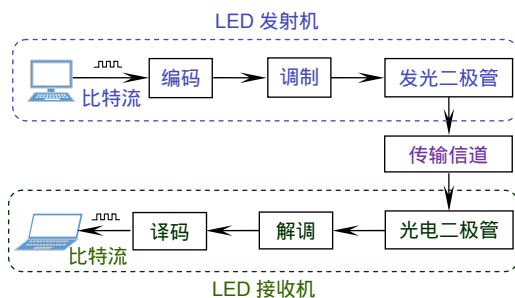


图 2 可见光通信系统框图

Fig. 2 Visible light communication system

调以及数据译码获得原始比特信息。常用的光电二极管有 PIN 光电二极管、雪崩光电二极管(APD)、图像传感器(CMOS、CCD)、光电倍增管。其中,CMOS、CCD 等图像光感器可以接收多个基色的光信号,但是其反应速度较低,难以实现高速传输应用;PIN 光电二极管接收响应灵敏度高,光学灵敏度高,价格相对较低廉,比较适合作为可见光通信的接收器件;雪崩光电二极管(APD)的响应速度,光学灵敏度比 PIN 光电二极管高,但是价格昂贵,驱动电路复杂度高,很难实现可见光通信的实用化<sup>[14]</sup>。

VLC 系统不仅要实现通信,并要保证照明需求,确保其满足对人眼的安全约束。因此对 VLC 系统的发射前端 LED 的选型、设计和优化更为迫切。

### 2.2 白光 LED 光源及其特性

可见光通信中常用白光 LED 提供照明和通信,白光 LED 可分为荧光粉型 LED 和多芯片 LED。荧光粉型 LED 是利用蓝光 LED 激发荧光粉的方式合成白光 LED。多芯片 LED 一般是将多种单色光(诸如红光、绿光、蓝光等)芯片封装在一起,并利用光的叠加原理形成白光 LED<sup>[15]</sup>。

表 1 概述了 LED 不同类别及主要特征、性能,从表 1 中可知,荧光粉 LED 结构简单,成本低,在日常照明中被广泛应用,一般荧光粉 LED 带宽为 3 MHz~5 MHz,发光效率为 130 lm/W<sup>[16]</sup>。但是,荧光粉 LED 自身也存在一些不足。首先,荧光粉 LED 具有非线性的电流-电压关系并且其动态范围有限,信号受到限制<sup>[17-19]</sup>。其次,荧光粉 LED 是一个窄带器件,调制带宽比较低,频谱利用率不高,并且荧光粉 LED 中含有的荧光粉响应比较缓慢,这些因素极大的限制了 VLC 系统的性能。

表 1 中列举了 RGB LED 以及 RGBYC LED 两种类型的多芯片 LED,多芯片 LED 的带宽一般高于荧光粉

表 1 不同类别 LED 的比较

Table 1 Comparison of different types of LEDs

| LED 类型      | 荧光粉 <sup>[16]</sup> | RGB <sup>[16]</sup> | RGBYC <sup>[20]</sup> |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 带宽/MHz      | 3~5                 | 10~20               | <50                   |
| 发光效率/(lm/W) | 130                 | 65                  | 120                   |
| 结构复杂度       | 低                   | 较高                  | 高                     |
| 主要构成        | 荧光粉                 | RGB 芯片              | RGBYC 芯片              |
| 成本          | 低                   | 较高                  | 较高                    |

LED 带宽,常用的多芯片 LED 为 RGB LED,一般为 10 MHz~20 MHz<sup>[16]</sup>。2017 年,南昌大学团队研发了一种无荧光粉五基色白光 LED,该白光 LED 发光效率为 100.5 lm/W<sup>[21]</sup>。并在 2019 年突破黄光鸿沟效应,将五基色 LED 的发光效率进一步提升至 120 lm/W,使其具备高性能的照明能力。并且,多基色 LED 天然地支持多信道同时通信,能获得比荧光粉 LED 更好的照明和通信性能<sup>[20]</sup>。但多基色 LED 本质上是由多个灯珠构成,因此也受到非线性失真和有限带宽的约束。

综上所述,荧光粉 LED 和多芯片 LED 都具有非线性特性,并且调制带宽仍旧有限,因此,本文将进一步剖析 LED 非线性失真和带宽调制限制并概述相应的解决方案。

### 3 LED 的非线性失真与补偿技术

在可见光通信系统中,器件的非线性特性会降低 VLC 的性能,而 LED 的非线性失真对其性能影响最大,其非线性特性引起发射信号发生削波和失真,从而导致 VLC 系统的误差矢量幅度上升及比特误码率恶化。具体而言,引起 LED 非线性失真原因有两种:一种是由 LED 光电转换过程中非线性映射引起的,另一种是由于 LED 的电压低于导通电压或是 LED 电流超过最大允许电流造成的非线性失真<sup>[8]</sup>。为了有效地减小 LED 非线性失真对 VLC 性能的影响,本文先探讨了多种非线性模型,并根据不同的模型分类总结各种非线性失真的补偿技术。

非线性模型分为无记忆 LED 非线性模型和记忆 LED 非线性模型两类。无记忆非线性模型主要使用非记忆多项式进行建模,然而无记忆多项式模型不足以描述 LED 的非线性特性,如图 3(a)和 3(b)所示的 LED 中非线性的电流-光功率关系和电压-电流关系,其频率决定的载流子密度响应会引入记忆效应<sup>[22]</sup>。常用的能够描述记忆效应的非线性模型有 Volterra 模型、记忆多项式模型、Wiener 模型、Hammerstein 模型等。这些模型可以用来描述 LED 非线性特性,并根据这些模型来设计 LED 非线性失真补偿方案。

目前,学术界和工业界为补偿 LED 的非线性失真问题做出了大量研究,主要集中在预失真技术<sup>[11,23-27]</sup>和后失真技术<sup>[28-32]</sup>。

#### 3.1 预失真技术

预失真是一种在输入信号未调制之前加入预失真模块来补偿 LED 非线性失真的方法。

图 4 为一般预失真结构图,  $x_k$  是预失真器的输入信号,  $T[\cdot]$  是补偿 LED 非线性的传递函数,  $u_k$  是预失真器的第  $k$  个输出信号,  $A[\cdot]$  是 LED 非线性幅度失真传递函数,  $I_k$  是 LED 的输出信号。  $u_k, I_k$  具体表达式为

$$\begin{cases} u_k = T[x_k] \\ I_k = A[u_k] \end{cases} \quad (1)$$

为了获得 LED 的线性,  $I_k$  和  $x_k$  应该相等,因此预失真器的传递函数可以表示为

$$T[\cdot] = A^{-1}[\cdot] \quad (2)$$

从上面公式推导可以看出,预失真就是通过硬件电路或软件算法或两者的结合,拟合出 LED 反向特性曲线的过程。

目前,预失真技术根据模型的原理分为三种:预失真电路模型,记忆多项式模型,自适应预失真模型。

**预失真电路模型:**预失真电路位于信号源和 LED 驱动之间,主要作用是 LED 提供驱动电流,预失真电路可分为微分相位(differential phase, DP)电路和微分增益(differential gain, DG)电路。预失真电路补偿技术框图如图 5。

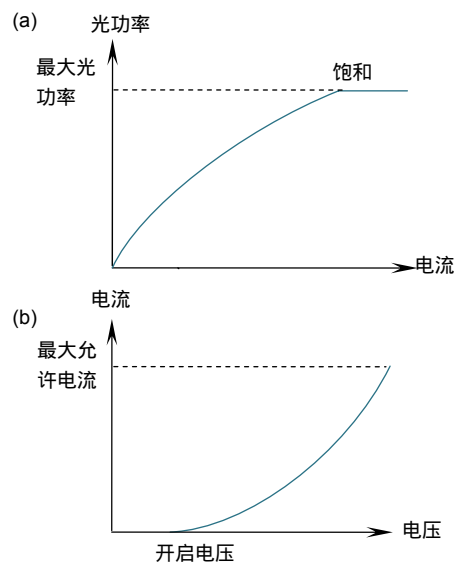


图 3 LED 非线性特性。

(a) LED 电流-光功率关系图; (b) LED 电压-电流关系图

Fig. 3 LED nonlinear characteristics.

(a) LED I-O curve; (b) LED V-I curve



图 4 预失真结构图

Fig. 4 Structure of pre-distortion



Asatani 等充分发挥 DP 和 DG 电路各自的优势设计了异构型预失真补偿电路, 其中, DP 电路能有效缓解 LED 的二次谐波失真, 性能增益达到 19 dB; 同时, DG 电路能有效改善 LED 的三次谐波失真, 能够获得 21 dB 的性能增益, 并且 DP 与 DG 电路互不影响, 但是 DP 电路需增加额外物理反馈回路, 并且 DP 电路对 LED 的非线性变化不能进行实时获取<sup>[23]</sup>。

**记忆多项式模型:** 记忆多项式模型是通过拟合 LED 的反向特性曲线对 LED 进行非线性补偿。Egala 等人采用记忆多项式模型来补偿 LED 的非线性失真。该模型能够拟合出 LED 反向特性曲线, 当功率补偿为 5 dB 时, BER 为  $2.5 \times 10^{-5}$ , 有效地改善了 LED 非线性, 结构简单, 稳定性好, 但是不能实时地获取 LED 非线性变化<sup>[11]</sup>。

**自适应预失真模型:** 上述两种方案都不能实时跟踪 LED 的非线性特性变化, 并且没有考虑带通内不平坦频率响应伴随的 LED 记忆效应, 针对这两个挑战, 姚赛杰等提出了一种自适应预失真补偿的方法<sup>[24]</sup>用来补偿 LED 记忆非线性失真。图 6 所示为自适应预失真结构图, 这种模型主要是在发射端增加一条反馈链路来实时获取 LED 的输出信号, 反馈链路由光电二极管、带通滤波器、放大电路以及模数转换器组成, 将所得到的数字信号输入到使用记忆多项式的参数估计模块, 得到合适的参数直接反馈给预失真模块。

通过该自适应预失真模型对 LED 的非线性失真进行补偿, 并在 16QAM(quadrature amplitude modulation)调制下对该模型进行了仿真验证, 如图 7 所示,

记忆效应的自适应预失真算法的 BER 性能比记忆多项式模型<sup>[11]</sup>的 BER 性能更好。

在文献[24]模型结构的框架上, Jin 等人提出了一种基于自适应的归一化最小均方(NLMS, normalised least mean square)的预失真方法, 该方法主要由 RAM (random access memory)和自适应 NLMS 算法组成, 利用自适应 NLMS 算法更新 RAM 以得到实时的反馈信号, 并发送给预失真模块。该方法无需增加额外物理反馈链路, 解决了 LED 由于老化或者温度变化导致的非线性参数发生变化的问题, 补偿了 LED 非线性失真, 改善了可见光通信系统的误码率, 如图 7 所示。在 16 QAM 调制下, 当 BER 为  $10^{-4}$  时, 该模型的预失真器性能增益比记忆多项式自适应预失真中的预失真器性能增益高 0.5 dB, 但是计算复杂度较高<sup>[25]</sup>。在 Jin 等人提出模型基础上, Mitra 等人提出一种新的非线性自适应算法, 基于切比雪夫多项式回归的非线性预失真器, 使用自适应的归一最小均方(NLMS)算法, 通过切比雪夫多项式展开来校正 LED 的非线性特性, 补偿可见光通信系统中 LED 非线性失真<sup>[26]</sup>, 与文献[25]中的模型相比, 该算法能够更好地校正 LED 非线性, 显著提高误码率性能, 但其代价是需要设计结构更加复杂的自适应模型。因此, 在自适应预失真技术的设计和实现中, 需要权衡并优化好非线性失真的补偿增益与电路/算法复杂度的关系。

表 2 对三种预失真经典方案进行了总结, 三种预失真方案在非线性模型、计算复杂度、额外物理反馈回路、模型结构等方面还存在一定的不足, 近年来,



图 5 预失真电路补偿技术框图  
Fig. 5 Pre-distortion circuit compensation scheme

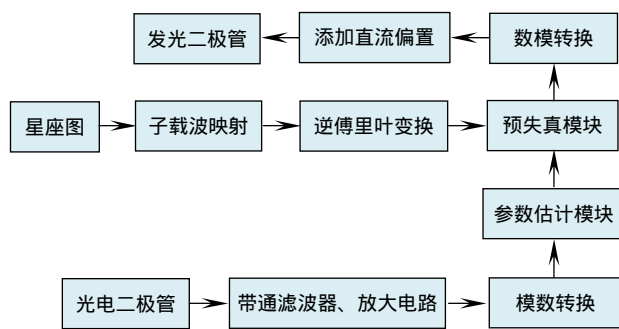


图 6 自适应预失真结构框图  
Fig. 6 Structure of adaptive pre-distortion

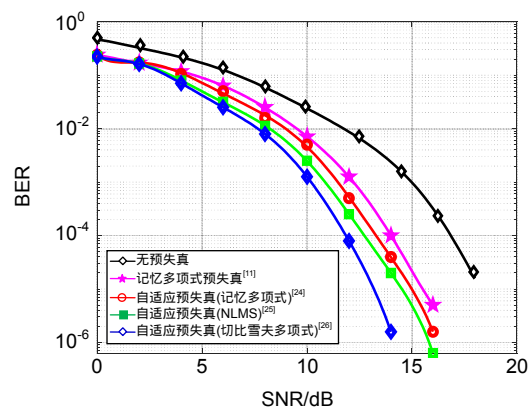


图 7 非线性方法性能比较  
Fig. 7 Performance comparison of nonlinear methods

表 2 预失真经典方法总结

Table 2 Pre-distortion classic method summary

| 预失真方法    | 记忆性 | 非线性模型    | 计算复杂度 | 额外物理反馈回路 | 经典参考文献 |
|----------|-----|----------|-------|----------|--------|
| 预失真电路    | 无   | 无        | 无     | 有        | [23]   |
| 记忆多项式模型  | 无   | 无记忆多项式   | 简单    | 有        | [11]   |
| 自适应预失真补偿 | 有   | 记忆多项式    | 适中    | 有        | [24]   |
| 自适应预失真补偿 | 有   | NLMS 多项式 | 适中    | 无        | [25]   |
| 自适应预失真补偿 | 有   | 切比雪夫多项式  | 简单    | 无        | [26]   |

迟楠等提出了一种新的基于机器学习聚类算法对 LED 进行非线性失真补偿<sup>[27]</sup>, 采用 CAP(carrierless amplitude/phase modulation)调制技术, 系统中 BER 至少改善了 50%, 显著提高了系统的通信性能。但该方法还处在发展阶段, 因此, 后期还需深入研究 LED 非线性失真问题, 以期提供更好的解决方案来补偿 LED 非线性失真。

### 3.2 后失真技术

后失真是一种在可见光通信系统接收端对已经失真的信号进行补偿以恢复出原始信号的方法。不同于预失真技术大部分需要增加额外的物理反馈回路, 后失真不需要增加物理反馈回路, 一般从软件算法对 LED 的非线性失真进行补偿, 因此需要消耗一定的计算资源。后失真技术根据模型原理分为三类: Volterra 判决反馈均衡模型、自适应后失真模型、频域均衡后失真模型。

**Volterra 判决反馈均衡模型:** Volterra 判决反馈均衡(DFE)一般包含线性项和滤波器反馈部分<sup>[28]</sup>, 如下所示:

$$y(n) = A(n) + B(n) + C(n) + \dots - \sum_{i=1}^W w(i)d(n-i) \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} A(n) = \sum_{i=0}^{L_1-1} a(i)x(n-i+D_1) \\ B(n) = \sum_{i,j=0}^{L_2-1} b(i,j)x(n-i+D_2)x(n-j+D_2) \\ C(n) = \sum_{i,j,k=0}^{L_3-1} c(i,j,k)x(n-i+D_3) \\ \quad \cdot x(n-j+D_3)x(n-k+D_3) \end{cases} \quad (4)$$

$y(n)$  是输出信号,  $x(n)$  是接收信号样本,  $a(i)$  是线性均衡器系数,  $b(i, j)$  和  $c(i, j, k)$  分别是二阶系数和三阶系数, 式(3)最后一项为均衡器的反馈部分,  $w(i)$  是反馈滤波器系数,  $d(n)$  是信号训练序列。图 8 为 Volterra 判决反馈均衡模型结构示意图。

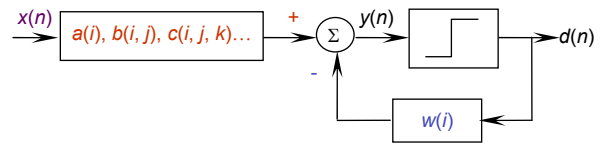


图 8 Volterra DFE 结构示意图

Fig. 8 Structure of Volterra DFE

Stepniak 等设计了 Volterra 判决反馈均衡器, 并证明具有二阶项 Volterra 判决反馈均衡器可以克服由荧光粉 LED 引起的 ISI(inter-symbol interference), 并且有效地补偿 LED 非线性<sup>[28]</sup>, 显著提高了系统的 BER 性能, 但是通常情况下, Volterra 级数非常复杂, 需要消耗更多的计算资源, 这会增加 VLC 系统的复杂度。

**自适应后失真模型:** Qian 等提出了一种记忆多项式的自适应后失真技术, 该模型主要是在接收端设计一条反馈链路用来估计和补偿接收端 LED 非线性失真, 该方法明显改善了系统的误差矢量幅度和误码率性能<sup>[29]</sup>, 并且能够将消耗的计算资源控制在合理范围内。Mitra 等提出了一种基于自适应稀疏 KMSER(kernel minimum symbol error rate)算法的后失真方法, 在 16QAM 调制技术下, 该方案与 Volterra 判决反馈均衡模型相比, 有更好的误码率性能, 并且可以降低计算负载<sup>[30]</sup>。

**频域均衡后失真模型:** Yuan 等提出了一种频域均衡和判决引导最小均方算法混合的后失真技术, 从频域角度补偿了 LED 非线性, 系统的传输速率达到 4.22 Gb/s, 这种模型能够解决 LED 不平坦频域响应造成的记忆性问题, 但该方法结构比较复杂<sup>[31]</sup>。

上面三种后失真补偿方法能够有效地补偿 LED 非线性失真问题, 但是模型结构都比较复杂, 算法复杂度较高。随着人工智能的发展, 考虑到机器学习方法对采样数据比较敏感, 徐旭东等人提出了一种新的机器学习后失真补偿方法, 利用人工神经网络和支持

向量机同样可以拟合出 LED 的反向特性曲线<sup>[32]</sup>,但是还处在发展阶段,需要进行改进。因此,后期还需研究新的解决方案来补偿可见光通信系统接收端 LED 非线性失真问题。

## 4 白光 LED 带宽拓展技术

白光 LED 是个窄带器件,调制带宽有限,在可见光通信中,是制约系统带宽的重要因素,限制了信道容量和高数据速率传输。因此,我们需要拓展白光 LED 的调制带宽,提高系统的通信性能。目前,已经有很多研究设计并攻关针对白光 LED 的带宽拓展技术,分别从发射端的预均衡技术和接收端的后均衡技术两方面进行研究;同时针对荧光粉 LED 存在的由荧光粉引起的 LED 响应和传输速率慢的挑战,提出并设计了在接收端采用蓝光滤波技术,在光电探测器接收到信号之前尽量滤除荧光粉频谱成分<sup>[33]</sup>。

### 4.1 预均衡技术

在可见光通信中,由于 LED 频率响应不平坦,严重影响系统的高速传输速率,此问题可以在发射端采用预均衡技术来补偿 LED 频率响应。预均衡技术可分为硬件预均衡和软件预均衡,硬件预均衡主要是设计模拟均衡电路对信号的衰减进行补偿,软件预均衡是通过信道特性自动调整发射信号波形,达到信号均衡效果的一种方法<sup>[14]</sup>。本文调研了不同的预均衡设计方法,总结和对比了串联谐振电路、无源超前校正电路、晶体管预均衡电路、改进型 Bias-T 均衡和桥 T 型幅度均衡电路,其中,晶体管预均衡电路和改进型 Bias-T 均衡电路是基于传统 Bias-T 均衡电路进行的改进。

**串联谐振电路:** Minh 等提出一种串联谐振电路用于 16-LEDs 阵列的 VLC 系统,并将 LED 的带宽拓展至 25 MHz,以及系统传输速率提升至 40 Mbit/s<sup>[34]</sup>,使用多个 LED 构成光源阵列,显著改善照明效果的同时进一步扩展系统整体带宽。但是由于每个 LED 的谐振频率点不一样,需要匹配每个 LED 的参数,电路复杂,调试难度大,成本高,不适合实际应用场景。基于此,Minh 采用三路串联谐振电路,使用单个大功率白光 LED 可将带宽拓展至 45 MHz,并且系统的通信速率达到 80 Mbit/s<sup>[35]</sup>。整个系统均衡后的频率响应值是由三路串联谐振电路各自的频率响应值进行相互补偿得到的,故需要对大量的元件进行参数调整,并且需要增加驱动电路数量,加大了电路的复杂度。

**无源超前校正电路:** 由于 LED 的频率响应特性曲

线是一条随着频率增大而呈现下降趋势的曲线,可以在 LED 进行光调制之前增加一级无源校正网络,对信号的高频分量进行补偿,使系统的幅频响应特性曲线更加平滑,从而达到频率均衡的效果。Li 等提出了一种单路调制的低复杂度电路,在后一级电路使用运放调整输出信号的幅值,调试难度小,成本低,并且可以采用多级无源校正网络,进行更加精确的频率特性补偿,达到更高的调制带宽<sup>[36]</sup>。为了进一步提高通信速率,Fujimoto 等采用大功率 RGB LED 设计了一种单路驱动方式的均衡电路,相对于串联谐振电路,该电路结构简单易调试,并且单路最大传输速率达到了 662 Mbit/s<sup>[37]</sup>。

**改进型 Bias-T 均衡电路:** 通常 VLC 系统中会使用 Bias-T 对信号添加直流偏置,使交流信号处在直流信号之上,然后将耦合的电信号转换为光信号,以保证 LED 的发射信号非负,并且能够保证 LED 持续发光,完成照明任务。Yeh 等设计了一种基于荧光粉 LED 的 VLC 系统,在 16QAM 调制技术下,系统响应带宽提升至 30 MHz<sup>[38]</sup>。该方案可以不使用 Bias-T 前一级的均衡器,降低了电路复杂度。但是,改进型的 Bias-T 电路对各个器件参数敏感,同时各个器件的参数会同时影响信号的幅频响应和信号的直流偏置,该方案存在一定的调试难度。

**晶体管预均衡电路:** 上述均衡方案采用 Bias-T 来驱动 LED,除此之外,还可基于晶体管驱动电路来驱动 LED 工作,并且对晶体管驱动电路进行适当的改进便可调整和改善信号的幅频响应。具体而言,Fujimoto 等采用了 RGB LED 作为信号发射源,设计晶体管预均衡电路,达到了 477 Mbit/s 的传输速率,该均衡器方案电路结构简单,无需使用 Bias-T 偏置电路,降低了电路成本<sup>[39]</sup>。陈雄斌等利用高速运算放大器和 RC 元件组成的预均衡电路,在 1.1 m 处使用荧光粉 LED 作为光源,经过蓝光滤光后使得系统带宽从 3 MHz 提高到 77.6 MHz,系统传输速率达到了 200 Mbit/s<sup>[36]</sup>。之后,该团队又提出了一种新型 NPN (negative-positive-negative)型晶体管预均衡电路,并且在接收端进行蓝光滤波,LED 的带宽达到了 175 MHz,传输速率达到了 460 Mbit/s<sup>[40]</sup>。值得注意的是,晶体管在工作时会产生大量的热量,如果长时间处在工作状态下,会导致系统产生大量热噪声,影响系统稳定性,甚至会烧毁晶体管。因此,使用晶体管驱动电路的均衡电路要考虑系统功耗、散热设计等参数特性。



**桥 T 型幅度均衡电路**：传统的桥 T 型网络存在峰值响应频率，对可见光通信系统的幅频特性补偿非常有限，仅能在小范围内提高系统频率响应。为了克服该挑战，迟楠等提出了一种桥 T 型幅度均衡器，在 RGB LED 为发射器件的 VLC 系统中实现了 750 Mbit/s 的通信速率<sup>[41]</sup>。此外，又设计了一种双级联桥 T 型幅度均衡器，使用荧光粉 LED 作为光源，实现了 1600 Mbit/s 的传输速率<sup>[42]</sup>。该均衡电路大大改善了 LED 的频率响应特性，进一步提高了系统调制带宽。相对于传统的桥 T 型幅度均衡器，该桥 T 型幅度均衡电路具有良好的线性幅频响应曲线，以及阻抗匹配性能。

针对现有的硬件预均衡电路都需要对电路中多个元器件及参数进行调试，本团队设计了一种微分均衡电路，前一级由电阻 R 和电容 C 并联构成信号的微分器，减小低频信号的幅度响应，采用五基色 LED 作为驱动器，在后一级 LED 驱动器前加入一个等效的输入电阻，经测试后 LED 的带宽达到了 150 MHz，系统传输速率达到单路 600 Mbit/s。并且本电路结构简单，调试难度低，只需对电容 C 进行调节，各元件参数耦合系数好。

从上述各种技术的原理和发展来看，硬件预均衡技术能够增加系统的带宽，但模拟电路不能灵活调节各个元件参数、带宽受限等问题，存在一定的局限性，而软件预均衡不需要考虑这些问题。主流的软件预均衡方案是 FIR(finite impulse response)预均衡滤波器。

**FIR 预均衡滤波器**：该滤波器设计思想是求出有限的脉冲响应来逼近给定的频率响应<sup>[14]</sup>。迟楠等提出了一种软件预均衡技术来拓展荧光粉 LED 的有限带宽，在 1.0 m 的自由空间中，系统达到了 2.08 Gbit/s 的传输速率。与硬件预均衡相比，能够明显改善系统的传输速率<sup>[43]</sup>，但是在实际的设计中，滤波器阶数与

系统的复杂度成正比，要选择合适的滤波器阶数来平衡好预均衡滤波器复杂度的关系。

表 3 概述了上述预均衡技术进展并且进行了分类，这些均衡技术都能拓展白光 LED 的带宽，但是硬件预均衡在电路复杂度、电路调试难易、电路稳定性、元件敏感性等方面还存在不足，同时软件预均衡需要平衡滤波器阶数和模型复杂度的问题，因此，硬件预均衡可以与软件预均衡以及高阶调制技术相结合，进一步提高 VLC 的稳定性和自适应性。

#### 4.2 蓝光滤波技术

荧光粉 LED 中含有荧光粉，而荧光粉响应比较缓慢会影响系统的传输速率<sup>[44]</sup>，针对此问题，Minh 等理论分析指出荧光粉 LED 响应带宽只有 2.5 MHz，蓝光响应的带宽约为 14 MHz<sup>[45]</sup>。由此可见，通过一定的技术减少荧光粉内的黄光分量，尽量只通过或者保留蓝光分量用作通信载体来改善荧光粉 LED 的带宽。具体而言，可在 VLC 系统的接收端前端放置一个蓝光滤波器，用于滤除和抑制荧光粉 LED 中由荧光粉引入的黄光分量<sup>[44]</sup>。值得注意的是，蓝光滤波片在滤除黄光分量的同时却损失了 60%的 LED 发射功率，对此，Tokgoz 等设计了一种蓝光响应平坦化的滤波器用来处理黄光荧光粉的黄光光谱成分，并同时不会损耗 LED 发射信号成分，其误码率性能相对蓝光滤波片能有效降低 12%~15%<sup>[46]</sup>。总体而言，包括蓝光滤波片和蓝光平坦化滤波器在内的蓝光滤波技术能有效改善系统的传输速率，提升系统的性能。

#### 4.3 后均衡技术

后均衡方法与预均衡方法类似，后均衡是一种在可见光通信系统接收端拓展带宽的方法。目前，后均衡技术可分为硬件后均衡和软件后均衡。

表 3 预均衡技术进展及对比

Table 3 Compare with pre-equalization method

| 预均衡类型 | 均衡技术          | LED 形态  | 带宽/MHz  | 传输速率/(Mbit/s) | 代表性文献 |
|-------|---------------|---------|---------|---------------|-------|
| 硬件    | 串联谐振电路        | 荧光粉 LED | 2.5-45  | 80            | [35]  |
| 硬件    | 晶体管 T 型电路     | RGB LED | 6.2-91  | 477           | [39]  |
| 硬件    | 无源超前矫正电路      | 荧光粉 LED | 12~77.6 | 200           | [33]  |
| 硬件    | NPN 型晶体管电路    | 荧光粉 LED | 3~175   | 460           | [40]  |
| 硬件    | 改进型 Bias-T 电路 | 荧光粉 LED | 1.0~30  | 190           | [38]  |
| 硬件    | 单级联 T 幅度均衡器   | RGB LED | 75~125  | 750           | [41]  |
| 硬件    | 双级联 T 幅度均衡器   | 荧光粉 LED | 17~366  | 1600          | [42]  |
| 软件    | 幂指数均衡         | 荧光粉 LED | 500     | 2080          | [43]  |



**硬件后均衡技术** Minh 等提出了一种一阶模拟后均衡器电路, 该电路与没有进行后均衡的电路相比, 带宽拓展到了 50 MHz, 系统通信速率达到了 100 Mbit/s<sup>[45]</sup>。之后, Li 等提出了一种新的后均衡电路, 包含两个无源均衡器和一个有源均衡器, 再结合蓝光滤波技术, 使得系统带宽达到 151 MHz, 传输速率达到 340 Mbit/s<sup>[47]</sup>。该硬件后均衡电路能够明显改善 LED 调制带宽, 提高系统的传输速率。此外, 荧光粉 LED 进行带宽拓展时, 可以将蓝光滤波技术与后均衡技术结合起来, Li 等将后均衡电路与蓝光滤波技术相结合, 系统传输速度达到 340 Mbit/s<sup>[45]</sup>。与本文提到的 Minh 等提出的一阶模拟后均衡器电路相比, 系统传输速率提高了 240 Mbit/s, 可见光通信系统的传输速率大幅度提高。

**软件后均衡技术**: 在可见光通信系统中, 为了满足照明需求并提高通信速率和覆盖范围, 一般会采用多 LED 构成发射阵列, 由此在接收端造成多径干扰, 进而导致符号间干扰, 使得信号发生失真, 从而限制系统的最大传输速率<sup>[48]</sup>。硬件后均衡电路可以拓展 LED 调制带宽, 但是不能动态补偿多径效应带来的信号失真问题。针对由多径效应带来的信道软件后均衡失真问题, 有多种解决方案, 例如自适应均衡、线性均衡等方法, 早前, Toshihiko 等提出了一种基于 LMS 的自适应均衡技术用来克服 ISI, 实验结果表明, 该技术能够有效地减轻 ISI 造成的影响, 但是传输速率相对较低<sup>[49]</sup>。迟楠等采用了一种结合 LMS 算法深度神经网络的线性均衡技术, 达到了 2.4 Gbit/s 的系统传输速率<sup>[50]</sup>, 误码率明显得到改善。

在可见光通信中, 可将预均衡技术和后均衡技术结合使用, 在发射端采用预均衡技术来拓展 LED 调制带宽, 在接收端采用后均衡技术来补偿信道产生的信号失真问题, 能够大幅度提高系统传输速率。

## 5 总结与展望

白光 LED 是可见光通信中的关键器件, 而白光 LED 的非线性失真和调制带宽有限是提升 VLC 系统性能的关键挑战, 因此, 本文以白光 LED 作为切入点, 对可见光通信系统白光 LED 器件及白光 LED 非线性失真和带宽调制特性进行了研究和剖析。

针对 LED 非线性失真问题, 分类概述了当前主流的高效的预失真技术和后失真技术, 这几种技术能够补偿 LED 非线性失真问题, 提高系统的性能, 但在非线性模型、计算复杂度、额外物理反馈回路、模型结构等指标上还存在局限性, 需要在这些指标上进行改进优化。针对白光 LED 有限带宽问题, 阐述了主要的预均衡技术和后均衡技术, 这几种方案都能拓展白光 LED 的有限带宽, 提高系统的通信速率。为了进一步提高系统的通信性能, 降低成本, 还需对电路复杂度、调试难易、稳定性、元件敏感性等硬件指标和计算资源、模型结构复杂度等软件指标进行深入研究。

通过从收发端对预失真补偿技术和 LED 带宽拓展技术的优劣以及设计的复杂程度的概述, 对发射模块和接收模块的优化技术进行了大量的阐述。从系统优化角度而言, 信道作为系统重要组成部分, 对系统有重大的影响, 首先, 发射端信号经过信道后, 由接收端接收, 会引入信道噪声, 若在接收端进行非线性失真补偿技术和均衡技术, 会使得系统更加复杂; 其次, 在发射端使用模拟预均衡技术, 可处理大部分频率响应不平坦问题, 但是接收端还存在来自信道和器件中的响应不平坦问题。因此, 本团队在发射端采用预失真技术和模拟预均衡技术, 在接收端加入数字后均衡技术, 来优化 VLC 的性能。利用矢量网络分析仪测试验证了方案的可行性, 即将矢量网络分析仪的信号输出功率设置为 10 dBm, 发射端和接收端间距为

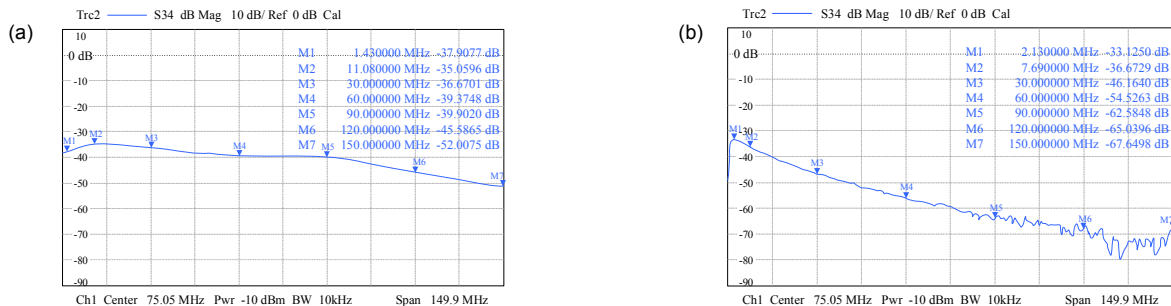


图 9 VLC 系统的幅频响应曲线。(a) 进行均衡处理; (b) 未进行均衡处理

Fig. 9 Amplitude-frequency response curve of VLC system. (a) Equalization; (b) No equalization

80 cm, 测试出 VLC 系统的幅频响应曲线如图 9(a), 相比于未进行均衡的幅频图 9(b)系统的低频信号幅度响应降低, 高频信号幅度响应得到补偿, 整体系统的幅频曲线变得平坦, 可用带宽达到 90 MHz 以上(-3 dB 调制带宽 60 MHz), 随着频率的增加, 信号幅度响应衰减缓慢, VLC 系统的幅频响应特性得到了很好地补偿, 系统调制带宽大幅度提升。

白光 LED 还存在封装材料及工艺等问题需要解决, 在 LED 封装工艺中会产生寄生电容、寄生电感等寄生参数, 寄生参数影响 LED 的调制带宽, 如果要降低白光 LED 寄生参数, 就需要优化 LED 芯片结构, 提高 LED 的调制带宽。现有一种新型 Micro-LED 器件可以在减小体积、成本的同时兼顾低功耗、响应灵敏度高特性, 故新型 Micro-LED 器件也可作为可见光通信器件进行深入研究。同时, LED 器件的形态越来越小可以为 MIMO(multiple-input multiple-output)技术的实现提供解决方案。但是在 MIMO 技术的实现过程中, 多个白光 LED 阵列会产生码间干扰, 为避免出现干扰, 使得接收光功率的分布趋向均匀, 设计合理的光源布局成为必要, 因此后期需深入研究光源布局、码间干扰消除技术等以期提高系统的性能。

## 参考文献

- [1] Shiu Y S, Chang S Y, Wu H C, et al. Physical layer security in wireless networks: a tutorial[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, **18**(2): 66–74.
- [2] Liu J, Sando J, Li W, et al. Long distance optical Wireless network employing multiple access scheme[C]//*Proceedings of 2007 IEEE Global Telecommunications Conference*, Washington, DC, USA, 2007: 2258–2262.
- [3] Green R J, Joshi H, Higgins M D, et al. Recent developments in indoor optical wireless systems[J]. *IET Communications*, 2008, **2**(1): 3–10.
- [4] Singh S, Kakamanshadi G, Gupta S. Visible light communication an emerging wireless communication technology[C]// *Proceedings of the 2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences*, Chandigarh, 2015: 1–3.
- [5] 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]//*Proceedings of the 2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks*, Coventry, UK, 2012: 1–4.
- [6] Zhu X, Wang F M, Shi M, et al. 10.72Gb/s visible light communication system based on single packaged RGBYC LED utilizing QAM-DMT modulation with hardware pre-equalization[C]// *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2018*, San Diego, 2018: 11–15.
- [7] Pathak P H, Feng X T, Hu P F, et al. Visible light communication, networking, and sensing: a survey, potential and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, **17**(4): 2047–2077.
- [8] Dimitrov S, Haas H. Information rate of OFDM-based optical wireless communication systems with nonlinear distortion[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(6): 918–929.
- [9] Zhao S, Cai S Z, Kang K, et al. Optimal transmission power in a nonlinear VLC system[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*, Orlando, 2015: 1180–1184.
- [10] Wang C, Zhou Y J, Chi N. Research of LED's nonlinear distortion compensation algorithm in visible light communications[J]. *China Light & Lighting*, 2017(7): 9–15, 26.  
王灿, 周盈君, 迟楠. 可见光通信中抗非线性方法的比较研究[J]. *中国照明电器*, 2017(7): 9–15, 26.
- [11] Elgala H, Mesleh R, Haas H. Non-linearity effects and predistortion in optical OFDM wireless transmission using LEDs[J]. *International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems (IJUWBCS)*, 2009, **1**(2): 143–150.
- [12] Ying K, Yu Z H, Baxley R J, et al. Nonlinear distortion mitigation in visible light communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, **22**(2): 36–45.
- [13] Chi N, Zhou Y J, Zhao J Q, et al. High speed visible light communication based on hardware pre-equalization circuit[J]. *Science & Technology Review*, 2016, **34**(16): 144–149.  
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.
- [14] Chi N. *Key Devices and Applications of LED Visible Light Communication*[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2015: 8.  
迟楠. LED 可见光通信关键器件与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 8.
- [15] Steigerwald D A, Bhat J C, Collins D, et al. Illumination with solid state lighting technology[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, **8**(2): 310–320.
- [16] Karunatilaka D, Zafar F, Kalavally V, et al. LED based indoor visible light communications: state of the art[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, **17**(3): 1649–1678.
- [17] Neokosmidis I, Kamalakis T, Walewski J W, et al. Impact of nonlinear LED transfer function on discrete multitone modulation: analytical approach[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(22): 4970–4978.
- [18] Tsonev D, Sinanovic S, Haas H. Complete modeling of nonlinear distortion in OFDM-based optical wireless communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(18): 3064–3076.
- [19] Ghassemlooy Z, Alves L N, Zvanovec S, et al. *Visible Light Communications: Theory and Applications*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [20] Jiang F Y, Zhang J L, Xu L Q, et al. Efficient InGaN based yellow-light-emitting diodes[J]. *Photonics Research*, 2019, **7**(2): 144–148.
- [21] Liu J L, Mo C L, Zhang J L, et al. Progress of five primary colours LED lighting source technology[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, **28**(1): 1–4, 29.  
刘军林, 莫春兰, 张建立, 等. 五基色 LED 照明光源技术进展[J]. *照明工程学报*, 2017, **28**(1): 1–4, 29.
- [22] Kamalakis T, Walewski J W, Ntogari G, et al. Empirical volterra series modeling of commercial light-emitting diodes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(14): 2146–2155.
- [23] Asatani K, Kimura T. Linearization of LED nonlinearity by pre-distortions[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1978, **25**(2): 207–212.
- [24] Yao S J, Xu H Y, Wang L Y, et al. Research of adaptive predistortion technique for nonlinear LEDs with memory effects[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(11): 1105007.  
姚赛杰, 徐浩煜, 汪亮友, 等. LED 记忆非线性自适应预失真技术

- 研究[J]. 中国激光, 2014, **41**(11): 1105007.
- [25] Kim J K, Hyun K, Park S K. Adaptive predistorter using NLMS algorithm for nonlinear compensation in visible light communication system[J]. *Electronics Letters*, 2014, **50**(20): 1457–1459.
- [26] Mitra R, Bhatia V. Chebyshev polynomial based adaptive predistorter for nonlinear LED compensation in VLC[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(10): 1053–1056.
- [27] Lu X Y, Zhao M M, Qiao L, et al. Non-linear compensation of multi-CAP VLC system employing predistortion base on clustering of machine learning[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2018*, San Diego, 2018: 11.
- [28] Stepniak G, Siuzdak J, Zwierko P. Compensation of a VLC phosphorescent white LED nonlinearity by means of volterra DFE[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(16): 1597–1600.
- [29] Qian H, Yao S J, Cai S Z, et al. Adaptive postdistortion for nonlinear LEDs in visible light communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, **6**(4): 7901508.
- [30] Mitra R, Bhatia V. Adaptive sparse dictionary based kernel minimum symbol error rate post-distortion for nonlinear LEDs in visible light communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(4): 7905413.
- [31] Wang Y Q, Huang X X, Zhang J W, et al. Enhanced performance of visible light communication employing 512-QAM NSCFDE and DDLS[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(13): 15328–15334.
- [32] Xu X D. Nonlinear post distortion for LED in visible light communication[J]. *Network and Communication*, 2017, **36**(22): 78–82, 90.
- 徐旭东. 可见光通信中 LED 的非线性后失真补偿技术研究[J]. *微型机与应用*, 2017, **36**(22): 78–82, 90.
- [33] Grubor J, Randel S, Langer K D, et al. Broadband information broadcasting using LED based interior lighting[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(24): 3883–3892.
- [34] 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.
- [35] Le Minh H, O'Brien D, Faulkner G, et al. 80 Mbit/s Visible Light Communications using pre-equalized white LED[C]// *Proceedings of the 2008 34th European Conference on Optical Communication*, Brussels, 2008: 1–2.
- [36] Li H L, Chen X B, Guo J Q, et al. 200 Mb/s visible optical wireless transmission based on NRZ-OOK modulation of phosphorescent white LED and a pre-emphasis circuit[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(10): 100604.
- [37] 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]//*Proceedings of the 2014 the European Conference on Optical Communication*, Cannes, France, 2014: 1–3.
- [38] 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.
- [39] 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]//*Proceedings of 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Anaheim, 2013: 1–3.
- [40] 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-NRS modulation[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, **22**(2): 68–73.
- [41] Huang X X, Shi J Y, Li J H, et al. 750Mbit/s visible light communications employing 64QAM-OFDM based on amplitude equalization circuit[C]//*Proceedings of 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, Los Angeles, 2015.
- [42] 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.
- [43] Zhou Y J, Liang S Y, Chen S Y, et al. 2.08 Gbit/s visible light communication utilizing power exponential pre-equalization[C]// *Proceedings of the 2016 25th Wireless and Optical Communication Conference*, Chengdu, China, 2016.
- [44] Grubor J, Lee S C J, Langer K D, et al. Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs[C]// *Proceedings of the 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication Post Deadline Papers*, Berlin, Germany, 2007: 1–2.
- [45] 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.
- [46] Tokgoz S C, Anous N, Yarkan S, et al. Performance improvement of white LED based VLC systems using blue and flattening filters[C]//*Proceedings of 2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking*, Rabat, Morocco, 2019: 1–6.
- [47] Li H L, Chen X B, Huang B J, et al. High bandwidth visible light communications based on a post-equalization circuit[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(2): 119–122.
- [48] Ding D Q, Ke X Z, Li J X. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(1): 131–134.
- 丁德强, 柯熙政, 李建勋. VLC 系统的光源布局设计与仿真研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(1): 131–134.
- [49] Komine T, Lee J H, Haruyama S, et al. Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white LED lighting equipment[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, **8**(6): 2892–2900.
- [50] Li G Q, Hu F C, Zhao Y H, et al. Enhanced performance of a phosphorescent white LED CAP 64QAM VLC system utilizing deep neural network (DNN) post equalization[C]//*Proceedings of 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China*, Changchun, China, 2019.

# LED nonlinearity compensation and bandwidth expansion techniques in visible light communication

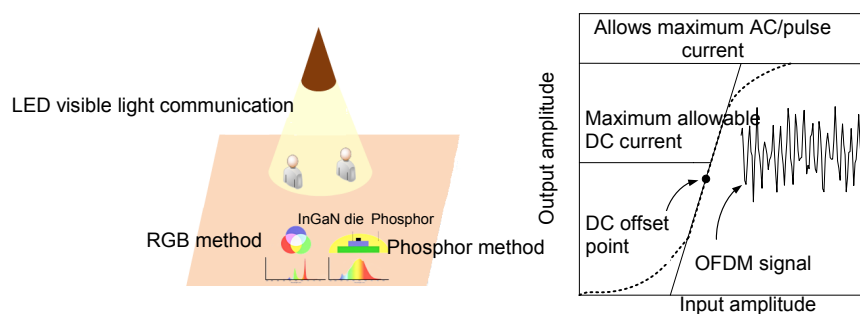
Wang Yuhao<sup>1</sup>, Cao Fan<sup>1</sup>, Deng Zhenyu<sup>1</sup>, Liu Xiaodong<sup>2</sup>,

Luo Yusang<sup>1</sup>, Ma Shuai<sup>3</sup>, Yan Qiurong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330000, China;

<sup>2</sup>School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

<sup>3</sup>School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China



General frame diagram

**Overview:** Visible light communication (VLC) is a promising technology that can be used as a useful complement to existing wireless communication networks, it can provide high speed, low latency and multi-device access communication services. With the help of high performance coding modulation technology of traditional wireless communication, a variety of physical layer communication technologies adapted to VLC system have been designed and implemented. Different from traditional radio frequency communication, VLC use LED as the transmitting source of signals. The modulation of LEDs is prone to produce nonlinear distortion and limits the modulation bandwidth, which has become the technical bottleneck of VLC high-speed communication. According to these two challenges, with white LED as the starting point, this paper expounds the characteristics of white LED that can effectively both illumination and communications, and then summarizes and classifies a variety of technologies for the nonlinear distortion compensation and extension of the LED modulation bandwidth. In view of the nonlinear distortion compensation technology, this paper enumerates pre-distortion compensation scheme such as the pre-distortion circuit model, memory polynomial model, adaptive pre-distortion model, and post-distortion compensation schemes which include the decision feedback equalization model, adaptive distortion model, the frequency domain equalization. However, a lot of limitations in nonlinear model, computational complexity, additional physical feedback loop, model structure and other indicators need to be improved and optimized. For the LED bandwidth expansion technology, the paper classifies and discusses the pre-equalization technology and post-equalization technology that expanding the bandwidth of white LED can further improve the communication performance of the system and reduce the cost of the system. It is necessary to further study the software indicators such as adjust the circuit complexity, circuit debugging difficulty, circuit stability, sensitivity of component hardware index and computing resources, complexity of model structure. The advantages and disadvantages of the pre-distortion compensation technology and LED bandwidth expansion and the complexity of the design are summarized from the receiver and transmitter to further optimize the system. This team adopted pre-distortion technology and analog pre-equalization technology at the transmitter, and added digital post-equalization technology at the receiver to optimize the performance of VLC. At last, in order to improve the performance of visible light communication system, this paper puts forward some open research problems, such as LED packaging materials and technology, new micro-LED device research, light source layout design, inter-code interference elimination technology.

**Citation:** Wang Y H, Cao F, Deng Z Y, *et al.* LED nonlinearity compensation and bandwidth expansion techniques in visible light communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190671

Supported by National Natural Science Foundation of China (61661028), Major Projects of the Ministry of Science and Technology (2018YF1404300), and Provincial Youth Fund Major Project (20152ACB21008)

\* E-mail: Yanqiurong@ncu.edu.cn