

高速可见光通信硬件预均衡技术研究进展

宋小庆, 魏有财, 赵梓旭, 王慕煜

装甲兵工程学院控制工程系 北京 100072

摘要 基于发光二极管(LED)的可见光通信(VLC)技术能够实现照明和数据通信的双重功能,成为近年来无线通信的研究热点之一。目前商用 LED 较小的调制带宽在很大程度上制约了高速 VLC 系统的快速发展。为了解决这一问题,提出了通过硬件预均衡技术拓宽 VLC 系统的-3 dB 调制带宽的方法,有效提高 VLC 系统传输速率;分析总结了近年来国内外应用于高速 VLC 系统中硬件预均衡技术的发展脉络和应用现状,并对比分析了不同预均衡方案的均衡控制策略、均衡电路结构以及均衡效果;对均衡技术的发展趋势提出建议,为今后高速 VLC 技术的研究提供参考。

关键词 光通信;可见光通信;硬件预均衡;带宽;发光二极管

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.080003

Research Progress on Hardware Pre-Equalization Technology for High-Speed Visible Light Communication

Song Xiaoqing, Wei Youcai, Zhao Zixu, Wang Muyu

Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

Abstract A visible light communication (VLC) technology based on light-emitting diode (LED), which integrates the dual functions of lighting and data communication, is becoming a hot topic of wireless communication research. Deficient modulation bandwidth of commercial LED limits the development of high speed transmission of VLC system. In order to solve the problem, a hardware pre-equalization technology is proposed to extend the -3 dB modulation bandwidth of VLC system effectively, and the transmission rate of VLC system is improved. The development progress and the application status both at home and abroad of hardware pre-equalization technology used in high-speed VLC system are summarized. The comparison of equalization control strategy, equalization circuit structure and equalization effect of different pre-equalization plans is carried out. The research trend of equalization technology is made, which provides a reference for the research of high-speed VLC technology in the future.

Key words optical communications; visible light communications; hardware pre-equalization; bandwidth; light-emitting diode

OCIS codes 060.1660; 060.2605; 060.4080; 060.4510

1 引言

半导体照明技术正在快速发展,预计至 2018 年半导体照明普及率将达到 80%。与传统的白炽灯和荧光灯相比,白光发光二极管(LED)具有功耗低、寿命长、亮度高、成本低等优点,随着 LED 制造技术的快速发展,基于白光 LED 的室内照明系统被认为将取代现有照明方式并成为下一代照明的主要方法^[1]。与此同时,LED 良好的调制特性使其兼具照明和通信功能。与传统的射频无线通信相比,基于 LED 的可见光通信(VLC)技术具有抗电磁干扰、高保密性、无需频谱认证、兼容性好等优势,应用前景十分广阔。

收稿日期: 2017-03-06; **收到修改稿日期:** 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(51507190)、军队科研计划(2014zx28)

作者简介: 宋小庆(1971—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事车辆综合电子系统与可见光通信等方面的研究。

E-mail: swxq@vip.sina.com

目前,用于室内 VLC 系统的白光 LED 可分为三类:1) 蓝光芯片发光并激发黄色荧光粉产生黄光,最终混合成白光的荧光粉 LED;2) 由红绿蓝(RGB)三色芯片发光混合成白光的 RGB-LED;3) 有机发光二极管(OLED)^[1-4]。荧光粉 LED 具有结构简单、发光稳定等优点,在室内照明领域应用广泛,但其调制带宽仅为几兆赫兹,限制了 VLC 系统的传输速率。商用 RGB-LED 的调制带宽略大于商用荧光粉 LED,然而也需要一定的电子电路控制 RGB-LED 各色芯片的发光比例以合成所需色温的白光,其结构相对荧光粉 LED 更为复杂且稳定性低。OLED 具有良好的机械和加工性能,但其调制带宽仅为 kHz 级,就目前的技术而言,并不适合应用于高速 VLC 领域。

高速 VLC 系统要求 LED 对高频信号具有良好的响应能力,针对普通荧光型 LED 带宽小的问题^[5],研发具有大调制带宽的 LED 作为系统光源是最直接的方法。研究者还提出了蓝光滤光技术,该技术可在接收端前滤除响应较慢的黄光分量,并使响应较快的蓝光分量通过^[6];使用调制带宽更大的 RGB-LED 替换荧光型 LED 作为光源,并使用波分复用(WDM)技术提高系统的传输速率^[7];采用正交频分复用(OFDM)^[8]、正交振幅(QAM)^[9-10]、离散多音调制(DMT)^[11]、无载波幅相调制(CAP)^[12-13]等调制技术提高系统传输速率;采用多输入多输出技术(MIMO)^[14],通过空分复用提高系统的传输速率。此外,均衡技术也是一个研究热点。均衡技术可分为软件均衡和硬件均衡。软件均衡技术主要涉及数字信号的处理^[15],通过设计数字滤波器能够有效地克服多径效应和码间干扰。硬件均衡技术主要通过设计硬件电路对衰减的信号进行补偿。作用于发送端部分的均衡技术称为预均衡,作用于接收端部分的均衡称为后均衡,后者的均衡思想与前者相似。本文总结了近年来硬件预均衡技术在 VLC 系统中的应用研究现状,对 VLC 系统中硬件预均衡电路的设计方案和工作原理进行整理和理论分析,梳理了该技术的发展脉络,以期对未来 VLC 技术的发展,特别是为改善 LED 调制带宽性能的研究提供参考。

2 硬件预均衡基本原理

2.1 LED 电流-光功率特性

图 1 所示为 LED 的电流-光功率(I - P)特性曲线。LED 的发光功率与流经它的电流近似呈线性关系,通过调制电流使 LED 产生明暗变化的光信号,从而实现信息的传输。在停止发送信号时段,为了让 LED 保持稳定的发光状态,需要为 LED 提供大小为 I_0 的偏置电流,从而实现 VLC 系统的照明和通信双重功能。图中 P_0 为 I_0 对应的光功率。

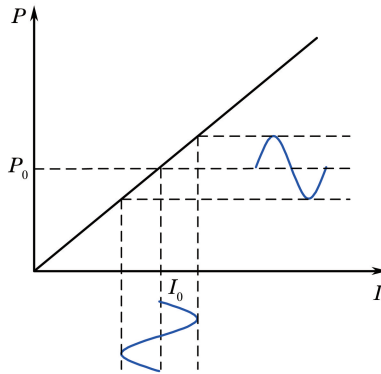


图 1 LED 电流-光功率曲线

Fig. 1 Current-optical power curve of LED

2.2 LED 频率响应特性

图 2 所示为某一商用荧光粉 LED 的频率响应特性曲线。LED 自身携带的电感特性使 LED 对高频信号的响应强度低于低频信号,当 VLC 系统的传输速率不断提高、信号的高频分量不断减小,信号会严重失真,误码率(BER)不断提高,从而影响系统传输的稳定性。

2.3 硬件预均衡基本思想

调制带宽对系统的通信速率和传输容量有着重要影响,为了解决 LED 因在高频段响应强度不足而引入

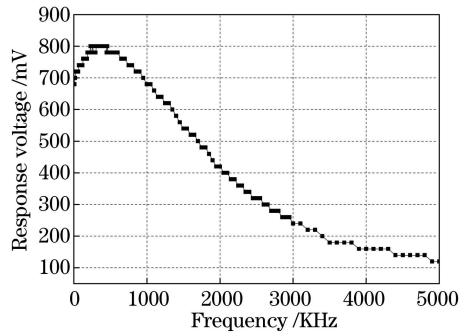


图2 普通商用荧光粉 LED 频率响应特性曲线

Fig. 2 Frequency response curve of ordinary commercial phosphor LED

的失真问题,在发送端电路中串联预均衡电路模块,预先对加载在 LED 的信号进行调制,通过提高 LED 对高频信号的响应并降低对低频信号的响应,实现均衡效果,拓宽 LED 调制带宽。

3 硬件预均衡技术发展现状及应用

2008 年,Minh 等^[16]提出在发射端驱动电路上串联谐振电容的策略来改善 LED 的频率响应特性,该策略使用多路谐振电路使 16 个荧光粉 LED 组成阵列的调制带宽从原来的 2.5 MHz 增加到 25 MHz,数据传输速率达到 $40 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同年,Minh 等^[17]使用三路并行的谐振电路将单个荧光粉型白光 LED 的调制带宽增加到 45 MHz,数据传输速率达到 $80 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在绝大多数的 VLC 系统中,信号需要通过 T 型偏置器(Bias-T)叠加到 LED 直流偏置电流上。2013 年,Fujimoto 和 Mochizuki^[18]提出由一种双极(NPN)型晶体管和由电阻和电容(RC)元件组成的预均衡电路,在不使用 Bias-T 器件的基础上,对 RGB-LED 中的红光进行调制,在绿光和蓝光不工作的条件下,将 RGB-LED 的调制带宽由 6.2 MHz 增加到 91 MHz,并利用电压放大器的峰值特征使系统带宽达到 160 MHz,以非归零开关键控(NRZ-OOK)为调制方式,实现数据传输速率为 $477 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输,传输距离为 40 cm。2014 年,Fujimoto 等^[19]结合硬件预均衡和硬件后均衡技术分别对 RGB-LED 中的三色发光芯片进行调制,实现 NRZ-OOK 调制下蓝光 $662 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 、红光 $600 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 和绿光 $520 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输速率。2014 年,中国科学院半导体研究所 Li 等^[20]采用 RC 元件和高速运算放大器组成的预均衡电路将荧光粉白光 LED 经蓝光滤光后的带宽由 12 MHz 增加到 77.6 MHz,实现了 NRZ-OOK 调制下 $200 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输速率,误码率低于 10^{-6} ,传输距离达到 1.1 m。在 Fujimoto 等研究的基础上,陈雄斌等^[21]提出一种新的基于 NPN 型晶体管的预均衡电路策略,该策略结合蓝光滤光技术将 LED 的 3 dB 调制带宽由 3 MHz 增加到 175 MHz,实现了 NRZ-OOK 调制下 $460 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输速率;由于 LED 的驱动电路采用了低功耗的 MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor),避免产生大量的热量,提高了系统的稳定性,传输距离在 1 m 的条件下,误码率低于 10^{-9} ;当传输距离达到 2.2 m,传输速率为 $350 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$,误码率低于 7×10^{-10} 。Li 等^[22]在硬件预均衡的基础上结合硬件后均衡技术和蓝光滤光技术,将 LED 的调制带宽由 3 MHz 增加到 233 MHz;当 VLC 系统的传输距离为 60 cm 时,NRZ-OOK 调制方式下的传输速率达到 $550 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$,误码率为 2.6×10^{-9} ;当传输距离提高到 160 cm 时,NRZ-OOK 调制方式下的传输速率降低到 $480 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$,误码率为 2.3×10^{-7} 。2015 年,Li 等^[23]提出一种硬件预均衡电路,在不经蓝光滤光的条件下,将荧光粉 LED 的调制带宽由 3 MHz 增加到 132 MHz,实现 NRZ-OOK 调制下 $330 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输以及正交幅度调制(64-QAM)下 $672 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输,系统传输距离为 1 m。Yeh 等^[24]设计由电阻、电感、电容(RLC)元件组成的 Bias-T 电路,将荧光粉 LED 的带宽由 1 MHz 增加到 30 MHz,实现正交幅度调制-正交频分复用(16QAM-OFDM)下传输速率范围为 $84.44 \sim 190 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输,传输距离为 0.75~2 m。同年,Huang 等^[25]设计一种由 RLC 元件组成的单级联桥 T 幅度均衡器,VLC 系统调制带宽由 75 MHz 增加到 125 MHz,基于 64-OFDM 调制技术实现 $750 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输,传输距离达到 2 m。此外,2016 年,该团队使用双级联桥 T 幅度均衡器,将 VLC 系统调制带宽由 17 MHz 提高到 366 MHz,实现 16QAM-OFDM 调制下 $1.6 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输,传输距离为

1 m^[26]。表 1 列出了截止到 2016 年为止 VLC 领域具有代表性的硬件预均衡技术的研究成果,这些研究团队采用不同的均衡策略改善 LED 频率响应特性,有效拓宽了 LED 调制带宽。

表 1 VLC 系统硬件预均衡技术研究成果

Table 1 Hardware pre-equalization technology research results of VLC system

Year	LED source	-3 dB bandwidth /MHz	Data rate /(Mbit·s ⁻¹)	Hardware pre-equalization	Reference
2008	Phosphorescent white LED	2.5-45	80	Based on series resonance	[17]
2013	RGB-LED	6.2-91	477	Based on transistor	[18]
2014	Phosphorescent white LED	12-77.6	200	Based on passive advance correction	[20]
2014	Phosphorescent white LED	1-30	190	Based on improved Bias-T	[24]
2015	Phosphorescent white LED	3-175	460	Based on transistor	[21]
2015	RGB-LED	75-125	750	Based on bridged-T amplitude equalizer	[25]
2016	Phosphorescent white LED	17-366	1600	Based on bridged-T amplitude equalizer	[26]

4 硬件预均衡策略分析

4.1 基于串联谐振的预均衡

针对 LED 和发送端电路自身引入的等效电感造成 LED 对高频信号响应能力不足的问题,文献[16]根据串联谐振原理,在 16-LEDs 阵列中每个 LED 所在驱动电路中的高速缓冲器和 LED 之间串联一个电容以抵消电感带来的不利影响,其单路均衡电路如图 3 所示,其中 C 为外加的谐振电容, L 为 LED 所在驱动电路和 LED 二者引入的串联电感总和,直流(DC)电流源为 LED 提供照明所需的偏置电流。该驱动电路使得 LED 在谐振频率 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 上消除电感的影响,使流经 LED 的电流最大化。

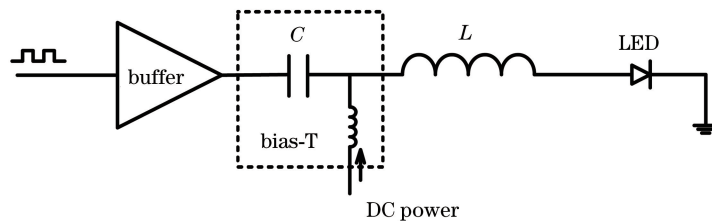


图 3 单路谐振预均衡电路

Fig. 3 Single resonant pre-equalization circuit

实验结果表明,串联谐振均衡电路将 16-LEDs 阵列的调制带宽由 2.5 MHz 增加到 25 MHz,有效地提高了 LED 对高频信号的响应能力,拓宽了 LED 的调制带宽。由于该方案需要对 16-LEDs 阵列中的每一个 LED 匹配合适的驱动电路,增加了系统的硬件电路的复杂度和制造成本。选用大功率 LED 来替代小功率 LED,这样既能满足照明所需的光照度,也能降低系统复杂度,节约硬件成本。

基于文献[16],Minh 等^[17]提出一种多谐振预均衡电路来均衡单个大功率白光 LED 的响应,在保证足够长的传输距离的情况下降低了系统的电路复杂度,其电路结构如图 4 所示。该方案采用了 3 路驱动电路,原始数据流经过三路并联的串联谐振电路均衡后通过 Bias-T 与直流电流信号耦合成一路信号,并将耦合信号加载在 LED 上。直流电流根据照明需求选取适当值,且必须确保 LED 工作在线性区,以减轻信号的非线性失真。

驱动电路 1~3 分别均衡荧光粉 LED 蓝光部分的低频、中频、高频信号分量的响应。均衡后的响应带宽由驱动电路 3 中的 C_2 决定,其谐振频率 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC_2})$ 。中频段响应范围由电容 C_1 决定,串联电阻 R_2

能够降低流经驱动电路 2 的电流,从而平坦中频段频率响应并降低电路的品质因数 Q 。在驱动电路 1 中串联一个电阻 R_1 可减小低频段响应电流。信号经过预均衡处理后,LED 的频率响应曲线如图 5 所示,该电路将荧光粉 LED 的调制带宽提高到 45 MHz,在此基础上,采用 OOK-NRZ 调制方式进行数据传输,实现 $80 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的传输速率。

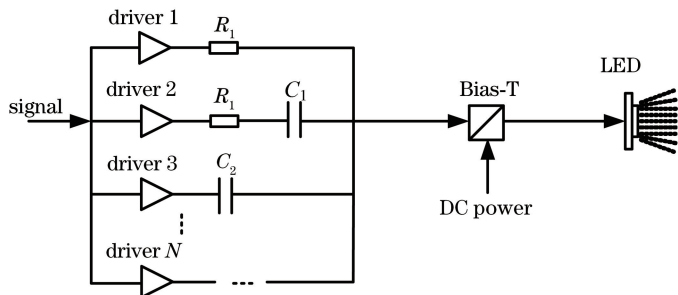


图 4 多谐振预均衡电路结构

Fig. 4 Multi-resonant pre-equalization circuit structure

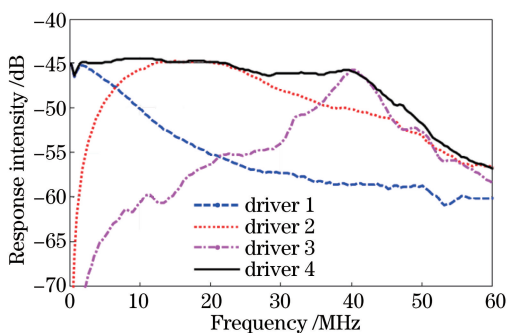


图 5 均衡后 LED 的频率响应曲线^[17]

Fig. 5 LED frequency response curve with pre-equalization^[17]

由于采用单个 LED 作为光源,该预均衡电路结构相对 16-LEDs 阵列所采用的方案更加简单,尽管如此,该方案需要三个支路的频率响应特性相互补偿才能从整体上均衡 LED 的频率响应特性,从而拓宽 LED 带宽,因而需要细致地选取电阻和电容的参数。若需进一步改进补偿效果和拓宽 LED 的带宽,可在原来电路基础上增加并联的驱动电路数量。

4.2 基于无源超前校正的预均衡策略

针对 LED 幅频响应曲线呈分段线性下降的特征,若能在信号加载到 LED 前通过提高信号高频分量的幅值实现对后续衰减的补偿作用,则能够平滑 LED 的幅频响应曲线,从而拓宽 LED 的调制带宽。2014 年,陈雄斌等^[20]提出了一种新的低复杂度的预均衡电路,为 VLC 硬件预均衡提供了新的思路。在文献[20]中,该团队以功率为 1 W 的荧光粉白光 LED(OSRAM LUW W5AM)作为发射端光源器件,经过蓝光滤光片滤除黄光分量后,接收端电路的 -3 dB 响应带宽可以达到 12 MHz,驱动电路上串联图 6 所示的预均衡电路,

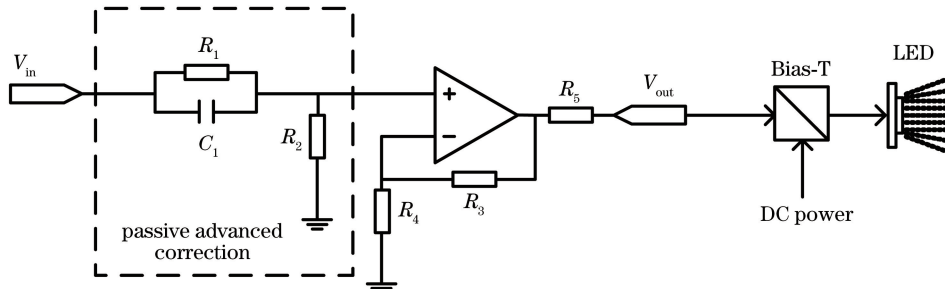


图 6 基于无源超前校正的预均衡电路结构

Fig. 6 Pre-equalization circuit structure based on passive advanced correction

信号经过预均衡电路后由 V_{out} 端口输出并加载到 Bias-T 上, 与偏置电流相叠加并驱动 LED 发光, 经测量该方案能够将 LED 的调制带宽增加到 77.6 MHz。基于此, 在 NRZ-OOK 调制方式下, 该 VLC 系统可以实现 $200 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输, 误码率低于 10^{-6} 。

超前校正装置的传递函数为^[27]

$$H(\omega) = \frac{1}{\alpha} \times \frac{1 + j\omega/\omega_1}{1 + j\omega/\omega_2}, \quad (1)$$

式中 $\alpha = (R_1 + R_2)/R_2$, $\omega_1 = 1/(R_1 C_1)$, $\omega_2 = (R_1 + R_2)/(R_1 R_2 C_1)$ 。如图 7 所示, ω_1 和 ω_2 分别对应超前校正装置频率响应曲线中两个转折频率 ω_1 和 ω_2 。

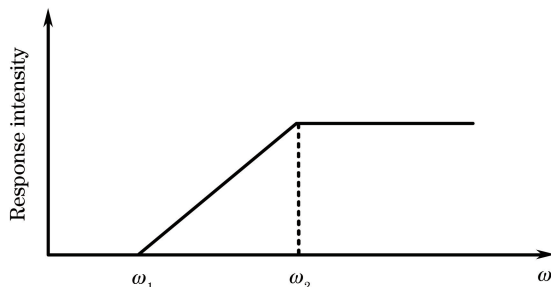


图 7 无源超前校正装置频率响应曲线

Fig. 7 Frequency response curve of passive advanced correction device

不同的 LED 具有不同的频响曲线, 根据需要补偿的频率范围选择合适的 R_1 、 R_2 和 C_1 的值, 从而确定 ω_1 和 ω_2 的值。该预均衡电路的总传递函数为

$$H(\omega) = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times \frac{1 + j\omega/\omega_1}{1 + j\omega/\omega_2}. \quad (2)$$

以 $H(0) = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 为低频参考点, 该预均衡电路的 3 dB 角频率为

$$\omega_{3 \text{ dB}} = \omega_1 \omega_2 \sqrt{\frac{1}{(\omega_2^2 - 2\omega_1^2)}}. \quad (3)$$

无源超前校正预均衡电路采用单路调制方式, 相比于多谐振预均衡电路结构更加简单, 与高带宽的运算放大器相配合可以灵活调整信号幅值。但只采用一阶校正时, 均衡电路对 LED 频率响应曲线的均衡能力有限。未来可以选择多个校正装置进行级联来提高校正的灵活性, 更加准确地调整 LED 的频率响应曲线, 以进一步拓宽 LED 的 -3 dB 带宽。

4.3 基于改进的 Bias-T 预均衡策略

基于串联谐振的硬件预均衡策略和无源超前校正的预均衡策略均使用的 Bias-T 元件作为交流信号和直流偏置电流的耦合器, 若能对 Bias-T 的结构进行改进, 使其能够发挥均衡 LED 的幅频响应的功能, 则可省略 Bias-T 前端的硬件预均衡电路, 进一步降低系统复杂度。为此, Yeh 等^[24] 提出由 RLC 元件组成的 Bias-T 对荧光粉 LED 的响应进行均衡, 其结构如图 8 所示, 其中电容 C 的作用是滤除直流分量并使交流信号通过, 电感 L 可以滤除交流噪声并使直流分量通过。

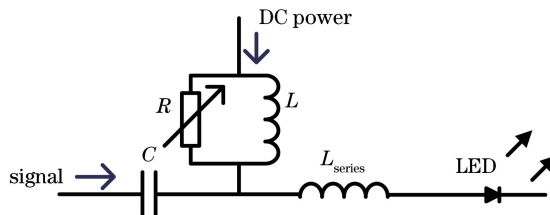


图 8 改进的 Bias-T 电路结构图

Fig. 8 Improved Bias-T circuit structure

根据不同的 LED 频率响应特性,通过调整 Bias-T 的电阻和电容的参数可补偿高频信号的衰减和减缓 LED 幅频响应曲线下落的趋势,从而拓宽 LED 的调制带宽。该系统可在不使用蓝光滤光片的条件下使单个荧光粉 LED 的响应带宽由 1 MHz 增加到 30 MHz。尽管该策略在提升 LED 带宽性能上不如前面两种策略,但由于省去了蓝光滤光片和 Bias-T 前端的预均衡电路,很大程度上降低了系统的硬件复杂度。值得注意的是,这种 Bias-T 需要合理地选用各元件参数,否则将容易引起不必要的基线漂移,从而影响信号调制的稳定性。

4.4 基于晶体管预均衡策略

上文介绍的 VLC 系统组成结构中均将 Bias-T 元件作为信号和直流分量的耦合器件,该策略在高速 VLC 系统中的应用是十分有效的,然而商用 Bias-T 价格昂贵,而自制的 Bias-T 在没有合理地设计和选取参数的情况下容易产生基线漂移现象,影响 VLC 系统信号传输的稳定性。考虑到 LED 仅有阈值电压而没有阈值电流,LED 的发光功率与流经的电流近似呈线性关系,利用电流的变化驱动 LED 发送信号是一种可行的方式。Fujimoto 等^[18]提出一种基于晶体管的驱动电路,该策略在不使用 Bias-T 模块的条件下,以 RGB-LED 为光源,仅对红光芯片进行调制,实验结果表明红光 LED 的响应带宽由原先的 6.2 MHz 增加到 91 MHz, NRZ-OOK 调制方式下可实现 $477 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的传输速率。该预均衡电路结构如图 9(a)所示,其中 LED 和电阻 R_1 作为发射极电路的负载, V_e 是晶体管的供电电压,调整供电电压 V_e 和电阻 R_1 的值可以设置合适的平均正向电流,同时利用并联在电阻 R_1 两端的 RC 电路能够调整 LED 的频率响应,使 LED 的响应强度在频率 $f_a = 1/[2\pi C_1(R_1 + R_2)]$ 处得到改善。若要进一步平滑 LED 的频率响应曲线,需要提高 RC 电路的复杂度,如图 9(b)所示,可以在 R_2 两端并联一个由 $R_3 C_2$ 组成的 RC 网络,以调整均衡电路的频率响应。

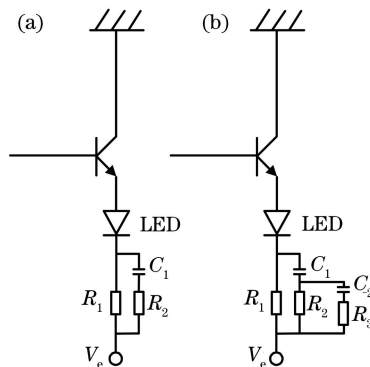


图 9 基于晶体管的预均衡电路。(a)一级均衡器;(b)二级均衡器

Fig. 9 Pre-equalization circuit with transistor. (a) Equalizer of level one; (b) equalizer of level two

同样,文献[20-21]也采用基于晶体管的硬件预均衡策略,其中文献[20]所述的策略将荧光粉白光 LED 调制带宽从 3 MHz 增加到 132 MHz,分别实现 NRZ-OOK 调制下 $330 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的传输速率和 64-QAM 调制下 $672 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的传输速率;文献[21]的方案将荧光粉白光 LED 带宽由 3 MHz 增加到 175 MHz,实现 NRZ-OOK 调制下 $460 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 传输速率。虽然该方案没有添加 Bias-T 元件,简化了发送端电路结构,但在以大功率 LED 为发射光源的应用情境下,长时间工作的晶体管会产生大量热量,增加了驱动电路的热噪声,不可避免地影响到发送端电路调制的稳定性。

4.5 基于桥 T 型幅度均衡器

随着硬件均衡技术的持续发展,VLC 系统正朝着缩小硬件体积并降低制造成本和结构复杂度的方向发展。新的硬件预均衡策略不断应用到 VLC 系统。文献[25]提出了一种新型的硬件预均衡策略——定阻对称桥 T 型幅度均衡器。传统的桥 T 型幅度均衡器有一个响应峰值频率,电路可在该峰值频率附近的小范围内提高 LED 的响应幅度,使得 LED 很大一部分具有改善潜力的频带没有得到利用。文献[25]中设计的定阻对称桥 T 型幅度均衡器与传统的桥 T 型幅度均衡器相比具有优异的线性度和阻抗匹配性能,根据负载的特性选取合适电阻、电感和电容参数,均衡后的信号依次通过功率放大器和 Bias-T 器件后与偏置电流叠加,并驱动红光 LED 发光,系统的调制带宽达到 125 MHz,实现了 64QAM-OFDM 调制下 $750 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的

数据传输,传输距离达到 2 m。该系统发送端部分的结构框图如图 10 所示。信号经过均衡器的均衡后,通过功率放大器与直流偏置电流耦合,以驱动红光 LED 发光。

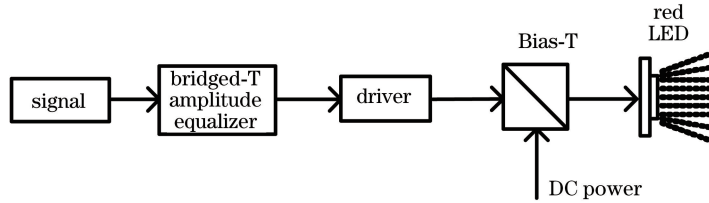


图 10 VLC 系统发送端结构框图

Fig. 10 Block diagram of VLC system transmitter

VLC 信道是一种复杂的指数衰减信道,单个桥 T 型幅度均衡器的动态均衡效果有限,为了进一步提高 VLC 系统的调制带宽,文献[26]采用双级联桥 T 型幅度均衡器对单个荧光粉 LED 的频率响应进行补偿, VLC 系统的调制带宽由 17 MHz(矢量网络分析仪的最低初始频率为 10 MHz)增加到 366 MHz,基于 16QAM-OFDM 调制方式实现了 1 m 的传输距离条件下 $1.6 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据传输。单级联桥 T 型幅度均衡器和双级联桥同构幅度均衡器的原理分别如图 11(a)、(b)所示,该类均衡器以电阻、电容和电感为基本元件,具有优异的线性度和阻抗匹配性能。

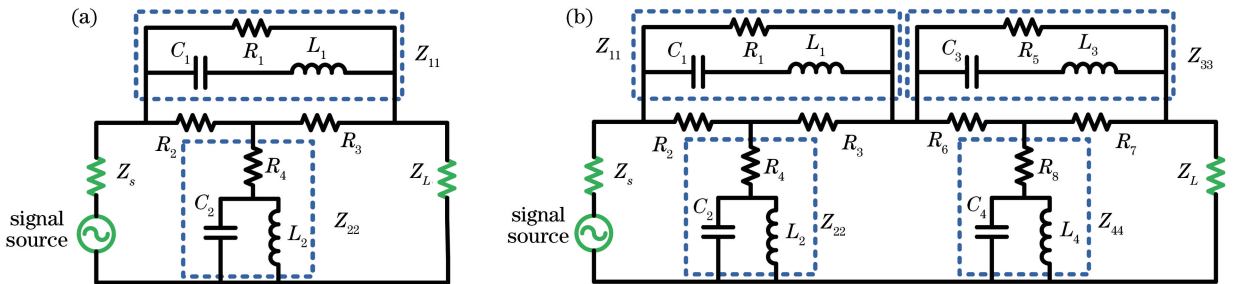


图 11 均衡器原理图。(a)桥 T 型幅度均衡器;(b)双级联桥 T 型幅度均衡器

Fig. 11 Schematic of equalizer. (a) Bridged-T amplitude equalizer; (b) double-cascaded bridged-T amplitude equalizer

下面对单级联桥 T 型幅度均衡器的结构进行分析。其中, Z_L 和 Z_s 分别是 LED 驱动电路负载和信号发生器的负载,它们的值均为 50Ω , Z_{11} 是电阻 R_1 、电感 L_1 和电容 C_1 组成的 RLC 网络 1 的等效阻抗, Z_{22} 是电阻 R_4 、电感 L_2 和电容 C_2 组成的 RLC 网络 2 的等效阻抗, Z_{11} 和 Z_{22} 的表达式分别为

$$Z_{11} = \left[R_1 \times \left(\frac{1}{j\omega L_1} + j\omega L_1 \right) \right] / \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 \right), \quad (4)$$

$$Z_{22} = \left(\frac{1}{j\omega C_2} \times j\omega L_2 \right) / \left(\frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 + R_4 \right). \quad (5)$$

为便于分析,分别设定 $L_1 = L_2$, $C_1 = C_2$, $R_2 = R_3 = R_0 = 50 \Omega$, 且 Z_{11} 和 Z_{22} 的乘积应满足

$$Z_{11} \times Z_{22} = R_2 \times R_3 = R_0^2. \quad (6)$$

为了使(6)式能够对任意 ω 都成立,且能够与 LED 驱动电路和信号发生器间的均衡电路满足阻抗匹配,此电路的前向增益响应 S_{21} 可表示为

$$S_{21} = \frac{1}{1 + [R_L/R_4 + (j\omega L_1)/(1 - \omega^2 C_1 L_1)]}. \quad (7)$$

由(7)式可知,当 $1 - \omega^2 C_1 L_1$ 趋近于 0,则 S_{21} 趋近于 1,且均衡带宽取决于 $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{C_1 L_1})$ 。双级联幅度均衡器由两个 T 型均衡器级联而成,其基本原理与单级幅度均衡器相同,但双级联均衡器的低频衰减更大,因此对于可见光信道的补偿作用更强。这类均衡电路仅采用电阻、电容和电感等无源器件,易整合到运算放大器或者 LED 中,对未来研究设计专用于 VLC 系统的集成芯片或者高带宽 LED 很有意义。

5 均衡策略控制效果及硬件复杂度分析

通常,信号的频率越高,LED响应的衰减程度越大,对高频信号实现均衡的难度也越大。针对不同文献中LED所具有的初始带宽不同,可通过分析采用均衡策略增加LED带宽的程度来衡量均衡控制效果^[28-29]。硬件预均衡电路的拓扑结构、器件种类、器件数量以及调制参数决定了硬件实现的复杂度。对5种均衡电路的均衡效果及其硬件实现复杂度的分析对比如下。

1) 基于串联谐振的预均衡策略。通过该策略,文献[17]将LED初始带宽从2.5 MHz增加到45 MHz,带宽增加了42.5 MHz。该策略采用多路谐振电路,各支路使用有源器件和无源器件相结合的驱动方式,支路间的均衡效果相互影响,通过各支路对LED的影响的综合分析来确定各器件参数。相对其他4种均衡电路而言,该电路硬件实现的复杂度最高,均衡的效果一般,不具有特别突出的优势。

2) 基于桥T型幅度均衡器的预均衡策略。通过该策略,文献[26]将带宽由17 MHz增加到366 MHz,带宽增加了349 MHz,优于其他4种均衡策略。该策略中的硬件采用的是无源器件,无需考虑晶体管和运算放大器等有源器件的带宽和功率等因素对均衡效果的影响,但该电路使用的RLC元件的数量较多,各参数协调具有一定难度,复杂度相对较高,适合应用于对通信速率要求较高的场合。

3) 基于超前校正的预均衡策略。通过该策略,文献[19]将带宽由3 MHz增加到77.6 MHz,带宽增加了74.6 MHz。超前校正均衡策略采用了单路驱动方式,相对多路串联谐振而言,硬件拓扑结构简单。由于电路中包含有源器件,在电路设计中需要考虑运算放大器的带宽和功率等因素对均衡效果的影响,具有一定的复杂度。总体来说,超前校正均衡策略与基于桥T型幅度均衡器的实现复杂度相当。

4) 基于晶体管的预均衡策略。通过该策略,文献[21]将带宽由3 MHz增加到175 MHz,带宽增加了172 MHz。该硬件预均衡电路采用单路驱动方式,在电路设计中需要考虑晶体管的带宽和功率等因素对均衡效果的影响,在拓扑结构方面与超前校正均衡策略的相当。在具体硬件电路上,省去了Bias-T部分,在简化电路复杂度的同时很大程度上降低了设计成本,而且采用RC元件较少。该电路复杂度相对较小,适用于对通信速率要求适中并以设计成本为主要考量因素的系统。

5) 基于改进的Bias-T均衡策略。通过该策略,文献[24]将带宽由1 MHz增加到30 MHz,带宽增加了29 MHz。与上述4种电路相比,该策略均衡的效果不如其他4种策略,但其拓扑结构和电路设计也最为简单,电路中只包含了1个电阻、1个电容和1个电感元件。该电路结构复杂度最低,适用于对通信速率要求不高而对简化结构和提高稳定性有一定要求的系统中。

6 结束语

作为一种新兴无线通信技术,目前VLC技术的研究大多数还处在实验室阶段。该技术发展仍然面临着诸多挑战,其中LED调制带宽受限是提高VLC系统传输速率的一大障碍,寻找新的策略来降低VLC系统复杂度以及拓宽系统调制带宽成为目前世界范围的研究热点。分析和讨论了5种拓宽LED调制带宽的硬件预均衡策略,这些策略有效地提高了VLC系统的带宽。VLC系统存在易受信道环境和噪声干扰的缺点,而目前的硬件预均衡技术的灵活性相对受限,难以对变化的信道环境进行参数自适应调整。若要进一步提升高速VLC系统的自适应性和稳健性,硬件预均衡还需要与软件均衡以及高阶调制等其他技术相结合。通过软件和硬件均衡相融合的方式拓宽通信系统传输带宽,推动VLC技术的产业化进程。

参 考 文 献

- [1] Haigh P A, Ghassemlooy Z, Rajbhandari S, *et al.* Visible light communications using organic light emitting diodes[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(8): 148-154.
- [2] Thai P Q. Real-time 138-kb/s transmission using OLED with 7-kHz modulation bandwidth[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(24): 2571-2574.
- [3] Thai P Q, Thanh N T, Shigeru S, *et al.* 127.5 kbps transmission using OLED with 7 kHz 3 dB modulation bandwidth in visible light communication system[C]. International Conference on Advanced Technologies for Communications, 2015: 15729725.

- [4] Song Xiaoqing, Zhao Zixu, Chen Kewei, *et al.* Visible light communication: Potential applications and challenges[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080004.
宋小庆, 赵梓旭, 陈克伟, 等. 可见光通信应用前景与发展挑战[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080004.
- [5] Chen Quanrun, Zhang Tao, Zheng Weibo, *et al.* Present research situation and application prospects of VLC based on white LED[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(4): 455-460.
陈泉润, 张涛, 郑伟波, 等. 基于白光 LED 可见光通信的研究现状及应用前景[J]. *半导体光电*, 2016, 37(4): 455-460.
- [6] Yeh C H, Liu Y L, Chow C W. Demonstration of 76 Mbit·s⁻¹ real-time phosphor-LED visible light wireless system [C]. *Opto Electronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology*, 2014: 14579865.
- [7] Wang Y G, Tao L, Huang X X, *et al.* 8-Gb/s RBY LED based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 15568083.
- [8] Tsonev D, Chun H, Rajbhandari S, *et al.* A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(7): 637-640.
- [9] Retamal J R D, Oubei H M, Janjua B, *et al.* 4-Gbit/s visible light communication link based on 16-QAM OFDM transmission over remote phosphor-film converted white light by using blue laser diode[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33656-33666.
- [10] Wang Y Q, Huang X X, Zhang J W, *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.
- [11] Sung J Y, Chow C W, Yeh C H. Dimming-discrete-multi-tone (DMT) for simultaneous color control and high speed visible light communication[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7538-7543.
- [12] 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.
- [13] Wu F M, Lin C T, Wei C C, *et al.* Performance comparison of OFDM signal and CAP signal over high capacity RGB-LED-based WDM visible light communication[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 13654821.
- [14] Jia Kejun, Hao Li, Yu Caihong. Modeling of multipath channel and performance analysis of MIMO-ACO-OFDM system for indoor visible light communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0706005.
贾科军, 郝莉, 余彩虹. 室内可见光通信多径信道建模及 MIMO-ACO-OFDM 系统性能分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0706005.
- [15] Chi Nan. LED visible light communication technologies[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 77-84.
迟楠. LED 可见光通信技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 77-84.
- [16] Minh H L, 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.
- [17] Minh H L, O'Brien D, Faulkner G, *et al.* 80 Mbit·s⁻¹ visible light communications using pre-equalized white LED [C]. *34th European Conference on Optical Communication*, 2008: 10426619.
- [18] Fujimoto N, Mochizuki H. 477 Mbit·s⁻¹ 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/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2013: 13581859.
- [19] 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]. *European Conference on Optical Communication*, 2014: 14768419.
- [20] 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): 14768419.
- [21] 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.
- [22] Li H L, Chen X B, Guo J Q, *et al.* A 550 Mbit·s⁻¹ 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.

- [23] Li H L, Zhang Y N, Chen X B, *et al.* High-speed phosphorescent white LED visible light communications without utilizing a blue filter[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(8): 080605.
- [24] Yeh C H, Chow C W, Chen H Y, *et al.* Adaptive 84.44-190 Mbit·s⁻¹ phosphor-LED wireless communication utilizing no blue filter at practical transmission distance[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9783-9788.
- [25] Huang X X, Shi J Y, Li J H, *et al.* 750 Mbit·s⁻¹ visible light communications employing 64QAM-OFDM based on amplitude equalization circuit[C]. Optical Fiber Communication, 2015: Tu2G.1.
- [26] Chi Nan, Zhou Yingjun, Zhao Jiaqi, *et al.* High speed visible light communication based on hardware preequalization 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.
- [27] Hu Shousong. Automatic control theory and application[M]. 4th ed. Beijing: Beijing Science Press, 2001.
胡寿松. 自动控制原理(第四版)[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2001.
- [28] Chi Nan, Lu Xingyu, Wang Can, *et al.* High speed visible light communication based on LED[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于LED的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [29] Chen H D, Wu C H, Li H L, *et al.* Advances and prospects in visible light communications [J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37(1): 011001.