

不同可见光接收元件对 LED 调制效率影响研究

宋素真, 桂林, 张华, 魏巍, 郑艺璇, 韦晓琪

(上海第二工业大学 计算机与信息工程学院, 上海 201209)

摘要: 针对提升可见光通信 (visible light communication, VLC) 信息传输效率问题, 研究了不同光接收元件下发光二极管 (light emitting diode, LED) 调制效率问题。VLC 系统通过光接收元件接收发端的可见光信号, 以确保信号的有效传输。在偏压为 3.4 V, 发射端与接收端之间距离为 10 cm 的实验条件下, 测量并比较了接收端为 LED、硅光电池和光电传感器时, 白光 LED 的调制效率。根据实验数据和拟合的结果表明: 当硅光电池为光接收元件时, 发射端的 LED 调制效率最高, 线性度较好, 一次拟合的 R^2 数值可以达到 0.95 以上; 当光电传感器为光接收元件时, 其调制效率为硅光电池调制效率的 66.15%~82.67%; 当 LED 为接收元件时, 在调制效率较高的 2.2~5.0 V (峰-峰值) 区域内, 其调制效率仅仅为硅光电池的 34.48%。

关键词: 可见光通信; 发光二极管; 光接收元件; 非线性; 调制效率

中图分类号: O439

文献标志码: A

Study of Effects on LED Modulation Efficiency Under Different Light Receiving Elements

SONG Suzhen, GUI Lin, ZHANG Hua, WEI Wei, ZHENG Yixuan, WEI Xiaoqi

(College of Computer and Information Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: Aiming at improving the efficiency of visible light communication (VLC) information transmission, the problem of light emitting diode (LED) modulation efficiency under different light receiving elements is studied. The VLC system receives the visible light signal at the beginning through light receiving elements to ensure effective signal transmission. Under the experimental conditions that the bias voltage is 3.4 V and the distance between the transmitting and the receiving end is 10 cm, the modulation efficiency of the LED detector, silicon photocell and photoelectric sensor to the white light LED is measured and compared. According to the experimental data and fitting, when the silicon photocell is used as the light receiving element, the LED at the transmitting end has the highest modulation efficiency and good linearity. The R^2 value of a single fitting can reach more than 0.95. When the photoelectric sensor is used as an optical receiving element, its modulation efficiency is 66.15%~82.67% of that of silicon photocell. When the LED is used as the receiving element, the modulation efficiency is only 34.48% of that of the silicon photocell in the region of 2.2~5.0 V with high modulation efficiency.

Keywords: visible light communication; light emitting diode; light receiving element; nonlinearity; modulation efficiency

收稿日期: 2021-04-20

通信作者: 桂林 (1981-), 男, 湖南祁阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向为短距离光通信, 光传感技术。

E-mail: guilin@sspu.edu.cn

基金项目: 上海第二工业大学基金飞跃计划 (EGD19XQD10) 资助

0 引言

可见光通信 (visible light communication, VLC) 是一种新型的无线光通信技术, 它以发光二极管 (light emitting diode, LED) 为发射器件, 以自由空间为载体来传输信号, 并同时实现了无线光通信和照明的双重功能。VLC 技术具有无电磁辐射, 抗电磁干扰, 节能高效的优点^[1-2]。在无线频谱资源严重紧缺情况下, VLC 是实现短距离、宽带通信的有效技术手段, 已经被纳入新一代移动通信技术体系^[3-5]。作为近些年的热点研究问题, 国内外学者在 VLC 领域取得了可喜的突破, 其通信速率也已经提升至 10 Gb/s^[6]。

从 VLC 系统的器件构成来看, 目前 VLC 的接收端主要以硅光电池作为检测器, 通过接收 LED 器件发射的信号来完成 VLC 的功能。从降低整体系统成本的角度考虑, 也有研究人员将 LED 器件直接作为 VLC 系统接收端的光电探测器来使用, 从而实现发射和接收端均采用 LED 器件, 且成本更为低廉的 VLC 系统^[7-10]。除了以上两种 VLC 接收器件外, 光电传感器也可作为接收器件来探测光信号。由于测量发射端 LED 器件的调制效率, 离不开接收端光电探测器的辅助, 如果接收端采用不同种类的光电探测器, 对发射端 LED 调制效率的测量有何影响, 成为了 VLC 领域中有待解决的问题, 然而目前很少有研究人员从实验上针对该问题进行研究与数据分析。

因此, 本文使用了硅光电池、光电传感器和 LED 3 种不同类型的光接收元件, 在偏置电压为 3.4 V 且发射端与接收端之间距离为 10 cm 的条件下, 以 LED 作为发射端, 实现 VLC 信息传输。测量并比较白色 LED 作为发射端, 硅光电池、LED 和光电传感器作为光接收端 3 种情况下的调制效率。实验结果表明, 在射频信号频率为 500 kHz, 交流信号峰峰值电压在 0.5~2.1 V 和 2.2~5 V 范围内, 硅光电池作为光接收元件具有更高的传输效率和更好的调制特性。当光电传感器为光接收元件时, 其调制效率为硅光电池调制效率的 66.15%~82.67%。当 LED 为接收元件时, 在调制效率较高的 2.2~5.0 V 区域内, 其调制效率仅仅为硅光电池的 34.48%。

1 系统模型与结构

具有电压偏置功能的任意波形发生器 (arbitrary waveform generator, AWG) 在实验中用于生成带有偏置电压的正弦波形。由于偏置三通已经集成至 AWG 中, 因此可以直接用来驱动 LED 器件。射频信号源由直流分量和交流分量组成, 可表示为:

$$V_t = V_{DC} + V_{rf} \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

式中: V_{DC} 为电压直流分量, V ; V_t 为加载在发射端 LED 器件上的总电压, V ; V_{rf} 为电压交流分量的幅度, V ; f_c 为射频信号的频率, Hz ; t 为时间, s 。发射器调制输入信号, 并通过 LED 源进行驱动。将调制信号加载到 LED 上时, LED 器件将其上所加载电压 V_t 和该器件中的电流 I_t 等电信号转化为光信号 (P_t) 并将其发送至自由空间。在接收端, 通过空间传输的光信号 (P_r) 收敛至光电探测器表面, 光电探测器端的光功率为 P_r , 光电探测器将该光信号转化为电流信号 I_r , 进而转化为电压信号 V_r , 信号转换过程如图 1 所示。

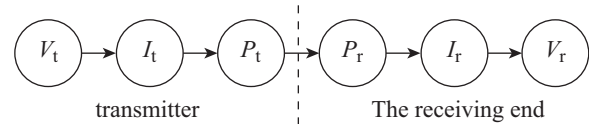


图 1 发射-接收信号转换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmit-receive signal conversion

实验中, VLC 系统主要由两部分组成: 包含 LED 的发射机和包含不同接收器件的光接收机。两者间的距离为 10 cm, 如图 2 所示。

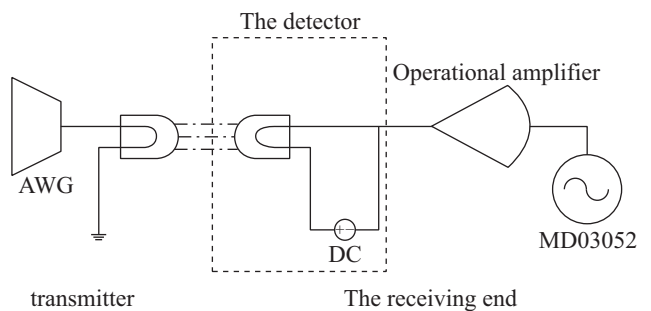


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup diagram

射频 (radio frequency, RF) 信号的强度通过电子频谱分析仪 (Tektronix, MDO3052 六合一混合域示波器的频谱分析功能) 测量。以 0.1 V (峰-峰值)

为幅度间隔将 RF 电压 (峰-峰值, 下同) 从 0.5 V 增加到 5.0 V, 测量得到的原始数据如图 3 所示, 其中图 3(a) 为 RF 电压在区间 0.5~2.1 V 不同器件接收端原始射频功率的情况, 图 3(b) 为 RF 电压在区间 2.2~5.0 V 时的情况。LED 器件的截止电压和饱和电压分别为 2.3 V 和 4.5 V, 假设该区域的 $V-I$ 曲线近似为线性, 为保证 LED 尽可能的工作在线性区域, 因此 LED 的偏置电压选择为截止电压和饱和电压的中点, 即 3.4 V。通过将测量得到的数据与线性模型拟合, 可以得到 LED 的调制效率, 即 V_r-V_{rf} 曲线的斜率, 如表 1 所示。 P_r 为光电探测器的接收光功率, V_r 为 P_r 转化得到的 RF 功率, V_{rf} 为加载在发射端 LED 器件上的交流电压幅度。

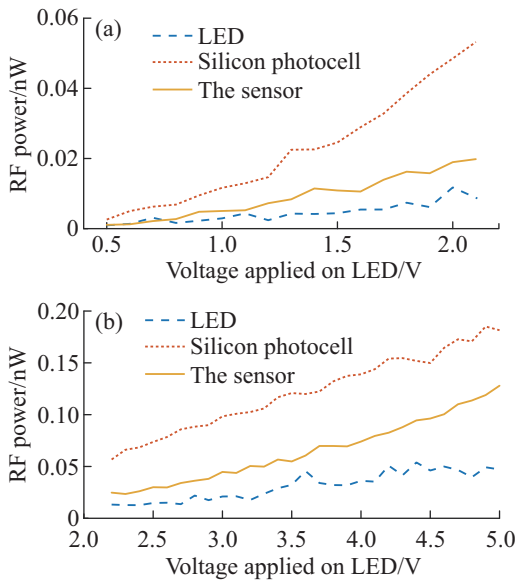


图 3 不同发射端 RF 电压条件下, 测得的不同器件接收端原始射频功率数据 (a) 0.5~2.1 V 和 (b) 2.2~5.0 V

Fig. 3 Measured raw data of RF power on the different detector for different RF voltages in transmitter (a) 0.5~2.1 V and (b) 2.2~5.0 V

2 结果与讨论

P_1 为接收端接收到的射频功率随输入端所加射频电压幅度变化的斜率, 其数值越大, 调制效率

越高。 R^2 为拟合曲线和原始曲线之间的误差参数, 数值越接近于 1, 线性度越好。当 R^2 接近 1 时, V_r-V_t 曲线呈线性。从表 1 可以看出, 在 0.5~2.1 V 区域, 当检测器是硅光电池时, 调制效率最高, P_1 达到 31.1 $\mu\text{W}/\text{V}$; 当检测器是光电传感器时, 调制效率为硅光电池的 66.24%, 但其线性度最高, 即 R^2 最大, 达到了 0.971 1。在 2.2~5.0 V 区域, 当检测器是硅光电池时, 调制效率最高, 且线性度最好 ($R^2 = 0.990 6$), 而此条件下, 光电传感器的调制效率可以达到硅光电池的 82.76%, 其线性度与硅光电池的较为接近。而 LED 作为光电探测器, 其调制效率在两个区间中均最低, 以其调制效率较高的 2.2~5.0 V 区域为例, 其数值仅仅为硅光电池的 34.48%, 且 LED 作为光电探测器的线性度也明显较差, R^2 均小于 0.9。

表 1 在 $f_c = 500 \text{ kHz}$ 时, 不同光探测器在不同电压下的数据拟合

Tab. 1 The data fitting for different light detectors at different voltages when $f_c = 500 \text{ kHz}$

电压区域	光探测器	$P_1/(\mu\text{W}\cdot\text{V}^{-1})$	R^2
0.5~2.1 V	LED	5.0	0.799 3
	硅光电池	31.1	0.955 5
	光电传感器	20.6	0.971 1
2.2~5.0 V	LED	15.0	0.862 2
	硅光电池	43.5	0.990 6
	光电传感器	36.0	0.976 0

当 LED 用作光接收元件时, 透射效率差。为了提升数据和模型的拟合程度, 增加多项式拟合的阶数, 发现当阶数增加到 8 时, R^2 达到 0.9 以上, 如表 2 所示。由此可见, LED 作为接收元器件时, 存在大量的非线性失真。相比之下, 当多项式拟合阶数为 1 时, 硅光电池和光电传感器 (作为光接收元件) 已达到 0.95 以上。因此, LED 作为光接收元件, 效果并不理想。

表 2 不同电压区域下 LED 作为光接收元件的不同阶次线性拟合结果

Tab. 2 Linear fitting results of different orders for different voltages when LED as light receiving element

电压区域	不同阶次							
	R^2-1	R^2-2	R^2-3	R^2-4	R^2-5	R^2-6	R^2-7	R^2-8
0.5~2.1 V	0.799 3	0.849 1	0.859 6	0.862 4	0.866 8	0.884 0	0.893 5	0.910 1
2.2~5.0 V	0.862 2	0.865 6	0.890 0	0.890 1	0.890 1	0.890 3	0.860 2	0.906 2

3 结 论

综上所述, 本文研究了 3 种常见的接收端光元件对于发射端 LED 调制效率的影响。对于 VLC 系统中最为常见的硅光电池作为光接收元件时, 发射端的 LED 调制效率最高, 线性度也最好, 一次拟合的 R^2 数值可以达到 0.95 以上, 因此, 研究人员在 VLC 实验中, 通常选择硅光电池作为光接收元件; 如果选择成本较低的光电传感器为光接收元件时, 其调制效率也可以达到硅光电池为光接收元件时调制效率的 66.15%~82.67%。当 LED 为光接收元件时, 即收发两端均选用 LED 器件时, 在调制效率较高的 2.2~5.0 V 区域内, 其调制效率仅仅为硅光电池为光接收元件时调制效率的 34.48%。在此基础上, 工程技术人员可以根据 VLC 系统的成本、调制效率等要求, 较为灵活的选择 VLC 系统中的光接收元件。

参考文献:

- [1] AL-HAMEED A A, HUSSEIN A T, ALRESHEEDI M, et al. Adaptive receiver for visible light communication system [C]//2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Trento: IEEE, 2016: 16280914.
- [2] DEND P, KAVEHRAD M. Real-time software-defined single-carrier QAM mimo visible light communication system [C]//2016 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS). Herndon: IEEE, 2016: 16071174.
- [3] CHI N, LU X Y, Wang C, et al. High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 030000.
- [4] ZHAO L, PENG K. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0706001.
- [5] CHEN Q R, ZHANG T, Zheng W B, et al. Present research situation and application prospects of VLC based on white LED [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(4): 455-460.
- [6] VUCIC J, KOTTKE C, NERRETER S, et al. White light wireless transmission at 200{+} Mb/s net data rate by use of discrete-multitone modulation [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(20): 1511-1513.
- [7] 武梦龙, 郭佳, 刘文楷, 等. LED 作为收发元件的双向可见光通信系统方案及实现 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 62-68.
- [8] LI S, PANDHARPIPANDE A, WILLEMS F M J. Two-way visible light communication and illumination with LEDs [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(2): 740-750.
- [9] KAMALAKIS T, WALEWSK J W, NTOGARI G, et al. Light-emitting diodes: The unknown entities [C]//2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks. Munich: IEEE, 2010: 11475390.
- [10] CHUN H. et al. LED based wavelength division multiplexed 10 Gb/s visible light communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(13): 3047-3052.