

# 调制度对可见光通信系统性能的影响

靳永超<sup>1,3</sup>, 陈雄斌<sup>2,3\*</sup>, 毛旭瑞<sup>3</sup>, 闵成或<sup>3</sup>, 潘天豪<sup>1,3</sup>, 陈弘达<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院大学微电子学院, 北京 100049;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083

**摘要** 针对速率为 100 Mbit/s、偏置电流为 0.15 A 的使用开关键控调制的可见光通信系统, 通过软件仿真和实验验证相结合的方法, 研究了调制度对通信系统性能以及照明效果的影响。结果表明, 随着调制度的增大, 误码率减小, 且距离越短, 误码率对调制度的变化越敏感。当速率为 100 Mbit/s、距离为 12.0 m 时, 在 1 W 荧光型发光二极管的可见光通信系统中, 调制度最小为 0.1 就可以满足前向纠错误码率门限要求。如果对通信系统的可靠性要求较高, 调制度应在 0.1 和误码率为 0 所对应的调制度之间选择, 且调制度的大小不会对照明效果产生影响。

**关键词** 光通信; 可见光通信; 调制度; 误码率

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0506001

## Influence of Modulation Degree on Performances of Visible Light Communication System

Jin Yongchao<sup>1,3</sup>, Chen Xiongbin<sup>2,3\*</sup>, Mao Xurui<sup>3</sup>, Min Chengyu<sup>3</sup>,  
Pan Tianhao<sup>1,3</sup>, Chen Hongda<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** Aiming at a visible light communication system under the on-off keying (OOK) modulation with a rate of 100 Mbit/s and a bias current of 0.15 A, the influences of modulation degree on the performance of the communication system and the lighting effect are investigated by software simulation combined with experimental verification. The results show that the bit error rate decreases as modulation degree increases. Further, the smaller the distance is, the more sensitive the bit error rate becomes to the change in modulation degree. As for a 100 Mbit/s visible light communication system containing a 1 W phosphor-coated light-emitting diode at a set distance of 12.0 m, the modulation degree should be at least 0.1 to satisfy the threshold requirement of forward error correction. Furthermore, if the communication system requires a high reliability, the modulation degree should be between 0.1 and the modulation degree corresponding to an error rate of 0, and it should have no effect on illumination effect.

**Key words** optical communications; visible light communication; modulation degree; bit error rate

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510

## 1 引言

发光二极管(LED)作为新一代照明光源正在快

速占领市场。相关数据显示:2010年LED市场占有率仅为1%,预计2025年LED市场占有率将达95%<sup>[1-4]</sup>。LED光源不仅具有很好的照明特性,还

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2018-12-16; 录用日期: 2019-02-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403605)、国家自然科学基金(61875183)

\* E-mail: chenxiongbin@semi.ac.cn

具有良好的可见光通信能力<sup>[5-7]</sup>。基于 LED 的可见光通信与无线电通信相比,具有一些优点,如单点高速率、系统容量大、保密性好、无电磁辐射等。因此可见光通信可以用于人口密集区的网络接入,保密通信,以及医院、煤矿矿井、飞行器、电磁静默的军事环境等领域。作为一种新的无线通信技术手段,可见光通信受到众多研究人员的关注<sup>[8-10]</sup>。2017年,迟楠等<sup>[11]</sup>采用红绿蓝黄4色LED作为光源,并采用级联的桥T型预加权电路和基于最大合并比算法的P型半导体-本征-N型半导体(PIN)差分接收器,实现了峰值传输速率高达9.51 Gbit/s的非实时传输,传输距离为1 m。2018年,陈雄斌等<sup>[12]</sup>基于带宽拓展技术搭建了1 W荧光型LED作为光源、PIN光电二极管作为探测器、单路速率达610 Mbit/s的实时传输演示系统,该系统在传输距离为6.2 m时的误码率为 $3.48 \times 10^{-5}$ 。

在可见光通信系统中,发射端用信号电流调制LED,使LED随着信号的变化产生明暗变化,探测器将接收到的光信号转换为电信号。目前大多数实验得到的调制度( $m_0$ )为百分之十几,过高的调制度可能会导致调制带宽减小,影响通信系统性能<sup>[13]</sup>。为了得到更好的通信效果和照明效果,需要研究调制度对通信系统的影响,以确定一个调制度的优选值。如何在保证可靠信息传输的同时满足高质量的照明状态是研究可见光通信的重要课题,现阶段仅有少量文献给出了相关研究成果,而且主要集中在可见光通信系统调光控制技术的研究。本文通过软件仿真和实验验证,研究了使用开关键控(OOK)调制的可见光通信系统中调制度和误码率的关系,进一步分析了调制度对可见光通信系统性能以及照明效果的影响。研究成果可以为照明与通信复用的可见光通信系统中调制度的选择提供依据。

## 2 理论分析

调制度可表示为

$$m_0 = \frac{\Delta I}{I_0}, \quad (1)$$

式中: $I_0$ 为偏置电流值; $\Delta I$ 为偏置电流和调制信号峰值电流的差值。调制度描述了交流信号与直流偏置之间的关系。

一个OOK调制电路发出一个矩形脉冲,假设其持续时间为 $1/R_b$ ,强度为 $2P$ 的脉冲表示信号1,没有脉冲表示信号0。为简化分析,假设误码率受到两个最近信号的控制,信道中的噪声为加性高斯

白噪声,则误码率为

$$R_{BE} = Q\left(\frac{d_{\min}}{2\sqrt{N_0}}\right), \quad (2)$$

式中: $Q$ 为标准正态分布的右尾函数; $d_{\min}$ 为有效调制信号之间的最小欧几里得距离; $N_0$ 为加性高斯白噪声功率谱<sup>[14]</sup>。在OOK信号集中,两个信号之间的最小欧几里得距离为

$$d_{\min} = \frac{2P}{\sqrt{R_b}}. \quad (3)$$

OOK调制的可见光通信系统的误码率为

$$R_{BE} = Q\left(\frac{P}{\sqrt{N_0 R_b}}\right). \quad (4)$$

随着调制度的增大, $d_{\min}$ 增大,误码率减小。

根据文献<sup>[15]</sup>,LED光功率和电流的关系曲线分为线性区和非线性区,当LED工作在线性区,LED光功率与注入电流成正比,随着调制度的增大,误码率减小;调制度太大会使LED工作在光功率-电流曲线的非线性区,调制度增大,LED光功率不会线性增大,使信号产生失真,误码率变大<sup>[15]</sup>。

从照明的角度出发,根据IEEE发布的LED频闪判定标准,当LED闪烁频率 $f' < 9$  Hz时,不可觉察波动深度限值为0.288%;当 $9 \text{ Hz} \leq f' \leq 3120$  Hz时,不可觉察波动深度限值为 $f' \times 0.032\%$ ;当 $f' > 3120$  Hz时,认为完全无频闪,符合照明要求,此时LED不会对人体健康产生威胁。当LED工作在线性区时,LED光功率与注入LED的电流成正比,所以当信号频率 $f < 9$  Hz时,调制度应小于0.288%;当信号频率范围为 $9 \text{ Hz} \leq f \leq 3120$  Hz时,调制度应小于 $f \times 0.032\%$ ;当信号频率 $f > 3120$  Hz时,调制度的大小不会对照明效果产生影响。

## 3 仿真与分析

可见光通信系统由LED调制电路、自由空间信道和解调电路三部分组成。在发送端,用信号电流改变流过LED上的电流,使LED随着信号的变化产生明暗变化,LED将电信号转化为光信号并发送至自由空间。在接收端,光电探测器将光信号转换为微弱的电流信号,再通过解调电路恢复出原始的发送信号。根据上述原理,利用OptiSystem软件中的伪随机二进制序列生成器、非归零码脉冲生成器、LED、自由空间光信道、光电二极管、跨阻放大器(TIA)、低通贝塞尔滤波器、3R再生器以及误码率分析仪等搭建了可见光通信仿真系统。

该可见光通信仿真系统的主要参数如表1所

示。在速率为 100 Mbit/s, 距离为 2.4, 4.8, 7.2, 9.6, 12.0 m 的条件下, 分别测试不同调制度下该可见光通信仿真系统的误码率。仿真结果如图 1 所示, 横坐标为调制度大小, 纵坐标为误码率。可以看出, 当距离一定时, 随着调制度的增大, 误码率减小, 且误码率减小的速率变小; 当调制度相同时, 随着距离的增大, 误码率增大; 距离越短, 误码率对调制度的变化越敏感; 当调制度等于 0.1 时, 在距离为 12.0 m、速率为 100 Mbit/s 的条件下, 该可见光通信系统的误码率为  $1.64 \times 10^{-3}$ , 小于前向纠错门限  $3.8 \times 10^{-3}$ , 通过纠正传输误码可实现高质量通信。

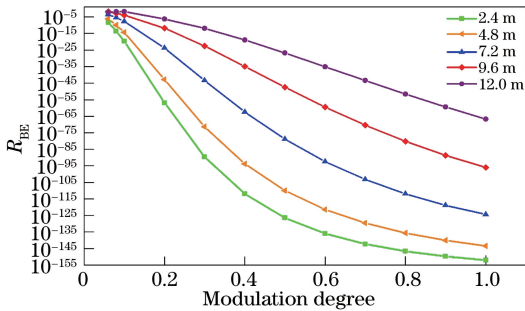


图 1 不同距离下 100 Mbit/s 可见光通信仿真系统调制度与误码率的关系

Fig. 1 Relationship between modulation degree and bit error rate of 100 Mbit/s visible light communication simulation system at different distances

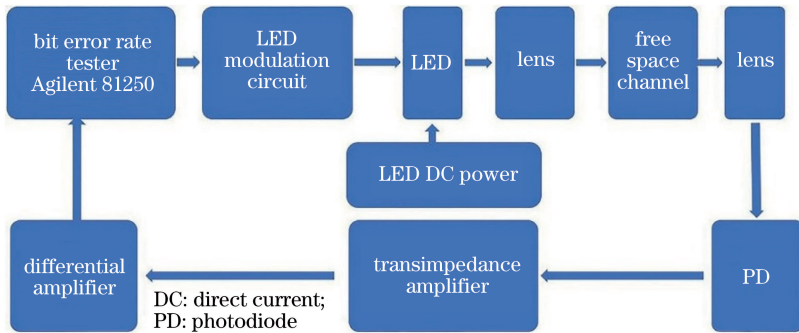


图 2 误码率测试原理图

Fig. 2 Principle diagram of bit error rate test

可见光通信系统误码率测试实物图如图 3 所示。实验中, 通过改变误码率测试仪产生的伪随机信号的幅度来控制调制度的大小, 记录不同调制度下该系统的误码率。为了确定输入不同幅度的信号对应的调制度, 将一个阻值较小的电阻与 LED 串联, 从而得知 LED 上信号电流的变化以及该输入信号对应的调制度大小。在直流(DC)偏置为 0.15 A、速率为 100 Mbit/s 的条件下, 测量调制度和误码率的关系曲线。由于实验条件所限, 在 2.4 m 光学平

表 1 可见光通信仿真系统主要参数  
Table 1 Main parameters of visible light communication simulation system

Item	Content
Modulation	OOK
LED wavelength /nm	450
Channel	Free space channel
Distance /m	2.4, 4.8, 7.2, 9.6, 12.0
Photodiode responsivity / (A·W <sup>-1</sup> )	0.25
TIA gain /Ω	10
Low pass Bessel filter cut-off frequency /MHz	75

## 4 实验验证

为了研究调制度对可见光通信系统误码率和照明效果的影响, 搭建了测试系统。实验原理图如图 2 所示。误码率测试仪输出伪随机信号, 利用 LED 驱动模块对伪随机信号进行处理, 并将处理后的信号加载到 1 W 荧光型白光 LED, LED 将电信号转换为光信号发送至自由空间。在接收端, PIN 光电探测器将接收到的光信号转换为电信号, 对电信号进行放大并将放大信号发送到误码率测试仪。误码率测试仪通过对比发送的信号与接收的信号, 计算出通信系统的实时误码率。

台上通过反射镜的反射, 分别测试了 2.4, 4.8, 7.2, 9.6, 12.0 m 距离下该可见光通信系统的误码率。实验结果如图 4 所示, 横坐标为调制度, 纵坐标为可见光通信测试系统的误码率。从图 4 中可以看出: 当距离相同时, 随着调制度的增大, 误码率减小; 当调制度相同时, 随着距离的增大, 误码率增大; 当调制度等于 0.1 时, 在距离为 12.0 m、速率为 100 Mbit/s 的条件下, 该可见光通信系统的误码率为  $1.17 \times 10^{-3}$ , 小于前向纠错门限  $3.8 \times 10^{-3}$ ; 在实验中, 随着



图 3 可见光通信系统误码率测试系统实物图

Fig. 3 Physical map of system for testing bit error rate of visible light communication system

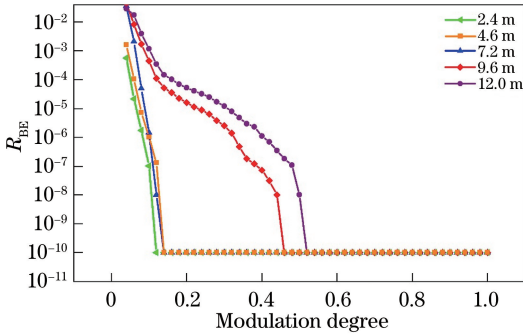


图 4 不同距离下 100 Mbit/s 可见光通信测试系统调制度与误码率的关系

Fig. 4 Relationship between modulation degree and bit error rate of 100 Mbit/s visible light communication test system at different distances

调制度的增大,未观察到 LED 闪烁。

## 5 分析与讨论

根据仿真结果(图 1):当速率为 100 Mbit/s、调制度为 0.1 时,2.4,4.8,7.2,9.6,12.0 m 距离对应的误码率分别为  $2.22 \times 10^{-20}$ ,  $4.84 \times 10^{-15}$ ,  $1.97 \times 10^{-8}$ ,  $1.09 \times 10^{-4}$ ,  $1.64 \times 10^{-3}$ , 都小于前向纠错门限  $3.8 \times 10^{-3}$ 。根据实验验证结果(图 4):当速率为 100 Mbit/s、调制度为 0.1 时,2.4,4.8,7.2,9.6,12.0 m 距离对应的误码率分别为  $1.02 \times 10^{-7}$ ,  $1.04 \times 10^{-6}$ ,  $1.48 \times 10^{-6}$ ,  $4.45 \times 10^{-4}$ ,  $1.17 \times 10^{-3}$ , 也都小于前向纠错门限  $3.8 \times 10^{-3}$ 。

在照明与通信融合的可见光通信系统中,需要同时兼顾通信和照明的需求,所以需要确定一个合适的调制度,既能满足通信的要求,同时对照明效果产生较小的影响。根据仿真和实验结果:当速率为 100 Mbit/s、调制度为 0.1 时,该系统误码率低于前向纠错门限  $3.8 \times 10^{-3}$ ;如果调制度更小,在 12.0 m 距离下,误码率大于前向纠错门限。所以在速率为 100 Mbit/s、通信距离为 12.0 m 的照明和通信融合的可见光通信系统中,调制度最小可以为 0.1,满足

前向纠错门限需求。

实验中,在速率为 100 Mbit/s,距离为 2.4,4.8,7.2,9.6,12.0 m 条件下,当误码率为 0 时对应的最小调制度分别为 0.12,0.14,0.14,0.46,0.52。如果对通信系统的可靠性要求较高,调制度应大于 0.1,随着调制度的增大,误码率逐渐减小为 0。由于 100 Mbit/s 的速率较高,调制度大小不会对照明效果产生影响。因此,如果对通信系统的可靠性要求较高,调制度可以在 0.1 和使误码率为 0 所对应的调制度之间选择。

## 6 结 论

通过对使用 OOK 调制的可见光通信系统进行仿真和实验,研究了调制度对可见光通信系统误码率以及照明效果的影响。针对速率为 100 Mbit/s、偏置电流为 0.15 A 的可见光通信系统的仿真和实验结果表明:随着调制度的增大,误码率减小,且误码率减小的速率变小;距离越短,误码率对调制度的变化越敏感。在速率为 100 Mbit/s、距离为 12.0 m、使用 1 W 荧光型白光 LED 的可见光通信系统中,调制度最小为 0.1 就可以满足前向纠错误码率门限要求,如果对通信系统的可靠性要求较高,调制度应在 0.1 和使误码率为 0 所对应的调制度之间选择,且调制度的大小不会对照明效果产生影响。从照明的角度出发,当 LED 工作在线性区时:若信号频率  $f < 9$  Hz,调制度应小于 0.288%;若信号频率  $9 \text{ Hz} \leq f \leq 3120$  Hz,调制度应小于  $f \times 0.032\%$ ;若信号频率  $f > 3120$  Hz,调制度的大小不会对照明效果产生影响。在实际使用中,LED 可能需要更大的电流,LED 工作在光功率-电流曲线的非线性区,其对通信系统性能产生的影响可能与直流偏置大小有关,有待进一步研究。

## 参 考 文 献

[1] Chang W G. Application status and development

- trend of LED lighting technology[J]. *Industrial & Science Tribune*, 2017, 16(13): 67-68.  
常卫刚. LED 照明技术的应用现状与发展趋势[J]. *产业与科技论坛*, 2017, 16(13): 67-68.
- [2] Jiang T, Liao Z, Duan Y Y. 30 years extension of energy saving lamps in the United States[J]. *China Policy Review*, 2012(1): 115-117.  
蒋涛, 廖忠, 段遥遥. 美国节能灯 30 年的推广窘境[J]. *中国经济报告*, 2012(1): 115-117.
- [3] Song X S. Japan semiconductor lighting engineering[J]. *Optics Mechanics & Electronics Information*, 2003, 20(11): 7-12.  
宋晓舒. 日本半导体照明工程[J]. *光机电信息*, 2003, 20(11): 7-12.
- [4] Huang K. Semiconductor lighting project and progress in the United States[J]. *Advanced Materials Industry*, 2008(9): 18-24.  
黄可. 美国半导体照明计划及进展[J]. *新材料产业*, 2008(9): 18-24.
- [5] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.
- [6] Li H Y, Chen X B, Li H L, *et al.* Effects of LED DC bias on the bit error rate in high speed VLC system[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(4): 528-531.  
李慧宇, 陈雄斌, 李洪磊, 等. 高速 VLC 系统中 LED 直流偏置对系统误码率的影响[J]. *半导体光电*, 2016, 37(4): 528-531.
- [7] Elgala H, Mesleh R, Haas H. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(9): 56-62.
- [8] Jovicic A, Li J Y, Richardson T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(12): 26-32.
- [9] Dou L P. 2016 China LED lighting industry trend forecast[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2016, 27(1): 1-3.  
窦林平. 2016 中国 LED 照明行业趋势展望[J]. *照明工程学报*, 2016, 27(1): 1-3.
- [10] Jia K J, Jin B, Hao L, *et al.* Performance analysis of DCO-OFDM and ACO-OFDM systems in indoor visible light communications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0806003.  
贾科军, 靳斌, 郝莉, 等. 室内可见光通信中 DCO-OFDM 和 ACO-OFDM 系统性能分析[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0806003.
- [11] 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): 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.
- [12] Chen X B, Li H L. Research and application of high-speed real-time visible light communication technology[J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(5): 53-59.  
陈雄斌, 李洪磊. 高速实时可见光通信技术研究及应用[J]. *科技导报*, 2018, 36(5): 53-59.
- [13] Chi N. LED visible light communication technologies[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 28-30.  
迟楠. LED 可见光通信技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 28-30.
- [14] Park H, Barry J R. Modulation analysis for wireless infrared communications[C]. *Proceedings IEEE International Conference on Communications ICC'95*, 18-22 June, 1995, Seattle, WA, USA, 5218612.
- [15] Luo H T. LED visible light communication technology based on ethernet[D]. Guangzhou: Jinan University, 2012: 10-13.  
骆宏图. 基于以太网的 LED 可见光通信技术研究[D]. 广州: 暨南大学, 2012: 10-13.