

# 室内可见光通信调制方法分析

张建昆 杨 宇 陈弘达

(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** 为了利用白光 LED 实现照明和通信的双重功能, 根据室内照明可见光通信的特点, 提出了反向归零码开关键控(ROOK-RZ)调制、反向脉冲位置调制(RPPM)、反向差分脉冲位置调制(RDPPM)和反向数字脉冲间隔调制(RDPIM)。在给出符号结构的基础上, 分析比较了各种调制方式的带宽需求和平均发射功率, 推导了误时隙率表达式, 并对各种调制方式的误时隙率进行了比较。结果表明, 开关键控(OOK)具有最小的带宽需求, RPPM 可获得最大的平均发射功率和最好的误时隙率, 但带宽需求最大。

**关键词** 光通信; 可见光通信; 调制; 白光 LED

**中图分类号** TN929.1      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/CJL201138.0405003

## Modulation Scheme Analysis of Indoor Visible Light Communications

Zhang Jiankun Yang Yu Chen Hongda

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** In order to use white LED as a lighting source and communication part, new modulation schemes such as reverse on-off keying with return-to-zero signal modulation (ROOK-RZ), reverse pulse position modulation (RPPM), reverse differential pulse position modulation (RDPPM), and reverse digital pulse interval modulation (RDPIM) are proposed for indoor visible light communications. Based on the given symbol structure, bandwidth requirement and average transmission power are analyzed and compared with on-off keying (OOK). Meanwhile, slot error rate is derived, and compared with each other. Simulation results show that OOK has the minimum bandwidth, while RPPM has the highest average transmission power and best slot error rate performance, but the maximum bandwidth.

**Key words** optical communications; visible light communications; modulation; white LED

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 060.4080

### 1 引 言

高亮度白光 LED 作为第四代电光源, 具有体积小、寿命长、功耗低、环保、显示指数好等优点, 有望替代白炽灯、荧光灯和高压气体放电灯等传统光源。此外, LED 响应时间短, 容易实现高速调制, 因而可以在照明的同时实现无线可见光通信。可见光通信的优点在于: 1) 无电磁干扰; 2) 独立空间内频带可以重复使用; 3) 不必增加额外的通信设备, 节约资源; 4) 对人眼无伤害。随着 LED 制造工艺的不断进步

和新型材料(氮化物晶体和荧光粉)的开发及应用, 高亮度白光 LED 的成本逐渐降低, 发光效率大幅提升, 市场前景广阔<sup>[1]</sup>。因而, 基于高亮度白光 LED 的可见光通信备受关注<sup>[2~4]</sup>。

无线光通信中可用的调制方式很多, 其中比较典型的有开关键控(OOK)、脉冲位置调制(PPM)、差分脉冲位置调制(DPPM)、数字脉冲间隔调制(DPIM)等<sup>[5,6]</sup>。由于人眼安全性和便携式移动通信装置的低功耗要求, 在给定误码率条件下, 光源平

**收稿日期:** 2010-08-19; **收到修改稿日期:** 2010-12-02

**基金项目:** 国家科技支撑项目(2009BAK43B36)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(2006A10401006)资助课题。

**作者简介:** 张建昆(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事可见光通信方面的研究。E-mail: Zhangjiankun@semi.ac.cn

**导师简介:** 陈弘达(1960—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子与微电子集成器件、集成电路与系统等方面的研究。E-mail: hdchen@semi.ac.cn

均发射功率应尽可能低。而在室内可见光通信中,不存在功耗问题,同时在满足室内照明亮度要求下,较高的平均功率可以减少 LED 的使用数量。本文基于以上分析,提出了 4 种调制方式,反向归零码开关键控(ROOK-RZ)、反向脉冲位置调制(RPPM)、反向差分脉冲位置调制(RDPPM)、反向数字脉冲间隔调制(RDPIM)。结合 OOK,对比分析了各种调制下的带宽效率、平均发射功率和误时隙率,为未来室内照明可见光通信提供一定程度的指导。

## 2 调制方式

### 2.1 符号结构

不同调制方法因符号结构的不同而具有不同的性能特点,研究各种调制方法的性能必须首先熟悉其符号结构。以调制阶数  $M=4$  为例,分别给出了 ROOK-RZ, RDPPM, RDPIM 和 RPPM 的调制符号波形,如图 1 所示。

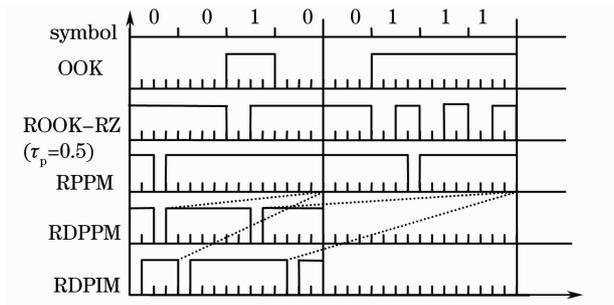


图 1  $M=4$  时 OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM 和 RDPIM 的符号结构

Fig. 1 Symbol structures for OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM and RDPIM when  $M=4$

### 2.2 带宽需求

带宽通常用功率谱密度的主瓣宽度来估计,是 sinc 函数。由于光信号脉冲时隙的宽度较窄,因此可以用脉冲时隙宽度取倒数来近似求信号带宽<sup>[7]</sup>。假设发射机以  $R_b$  的传信率发送信号,则 OOK 所需要的带宽与其时隙宽度成反比:  $B = \frac{1}{T_{OOK}} = R_b$ 。同理可得其他调制方式的带宽需求如表 1 所示。在各种调制方式中,带宽需求由比特波形中最小的脉冲宽度决定。因此, RPPM, RDPPM 和 RDPIM 的带宽需求为其时隙的倒数。另外, RDPPM 和 RDPIM 由于各个符号长度不一,计算时分别取各平均符号长度<sup>[5]</sup>

$$L_{avg, RDPPM} = \frac{(2^M + 1)}{2},$$

$$L_{avg, RDPIM} = \frac{(2^M + 3)}{2}.$$

表 1  $R_b$  给定时, OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM 和 RDPIM 的带宽需求

Table 1 Bandwidths of OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM and RDPIM for a given value of  $R_b$

Modulation schemes	Bandwidth
OOK	$B_{OOK} = R_b$
ROOK-RZ	$\frac{B_{OOK}}{\tau_p}$
RPPM	$B_{OOK} \frac{2^M}{M}$
RDPPM	$\frac{B_{OOK} (2^M + 1)}{2M}$
RDPIM	$\frac{B_{OOK} (2^M + 3)}{2M}$

各调制方式相对 OOK 的归一化带宽需求如图 2 所示。可见, RPPM, RDPPM 和 RDPIM 的带宽需求均随着调制阶数的增加而增大。其中 RDPPM 和 RDPIM 的带宽需求几乎一致, RPPM 的带宽需求最高, OOK 的带宽需求最低。

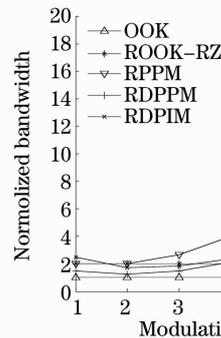


图 2 归一化的 OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM 和 RDPIM 的带宽需求比较

Fig. 2 Normalized bandwidth requirement comparisons of OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM and RDPIM

### 2.3 平均发射功率

在峰值功率相同的条件下,发射一个相同符号时各种调制方式的平均发射功率不同。假设峰值功率为  $P_t$  以及二进制信息比特“0”和“1”等概率出现,则 OOK 的平均功率为  $P_{OOK} = P_t/2$ <sup>[8]</sup>。同理,其余调制方式的平均功率如表 2 所示。

各调制方式的平均发射功率如图 3 所示。可以看出,对于 RPPM, RDPPM 和 RDPIM 随着  $M$  的增加归一化平均功率趋于最大值 2。调制阶数相等时, RPPM 的功率高于其他调制方式。

表 2 给定发射功率  $P_s$  时,OOK,ROOK-RZ,RPPM, RDPPM 和 RDPIM 的平均发射功率

 Table 2 Average transmit power of OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM and RDPIM for a given power of  $P_s$ 

Modulation schemes	Average transmitter power
OOK	$P_{\text{OOK}} = P_t/2$
ROOK-RZ	$P_{\text{OOK}}(1 + \tau_p)$
RPPM	$\frac{P_{\text{OOK}}(2^M - 1)}{2^{M-1}}$
RDPPM	$\frac{2P_{\text{OOK}}(2^M - 1)}{2^M + 1}$
RDPIM	$\frac{2P_{\text{OOK}}(2^M + 1)}{2^M + 3}$

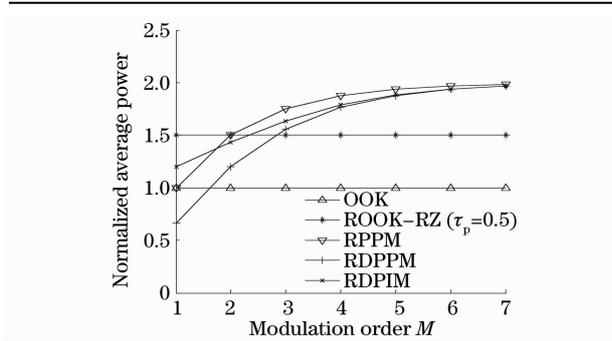


图 3 归一化的 OOK,ROOK-RZ,RPPM,RDPPM 和 RDPIM 的平均发射功率比较

Fig. 3 Normalized average transmit power comparisons of OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM and RDPIM

## 2.4 误时隙率

通信系统在强背景光影响下噪声主要为散弹噪声,可将其视为与信号无关的高斯白噪声 (AGWN)<sup>[9]</sup>,在无背景光或弱背景光影响下的噪声主要来自前置放大器,同样可将其视为 AGWN<sup>[10]</sup>。若假定不存在荧光灯的干扰,那么可见光通信信道的模型可以用基带线性系统模型来表示

$$Y(t) = R \cdot x(t) \otimes h(t) + n(t), \quad (1)$$

式中  $h(t)$  为冲激响应,  $R$  为探测器响应度,  $\otimes$  表示

卷积,  $n(t)$  表示 AGWN。

为讨论方便,认为接收机的带宽很宽,抽样判决器输入端得到的  $x(t)$  在发送脉冲时为  $\sqrt{P_t} + n(t)$ ,不发送脉冲时为  $n(t)$ ,其中  $P_t$  为判决器输入端的信号峰值功率。若令判决门限为  $b$ ,则将有脉冲时隙误判为无脉冲时隙的概率为<sup>[11]</sup>

$$P_{e1} = (1/2) \{1 + \text{erfc}[(b - \sqrt{P_t}) / \sqrt{2\sigma_n^2}]\} = (1/2) \text{erfc}[(\sqrt{P_t} - b) / \sqrt{2\sigma_n^2}], \quad (2)$$

将无脉冲时隙误判为有脉冲时隙的概率为

$$P_{e0} = (1/2) \text{erfc}(b / \sqrt{2\sigma_n^2}), \quad (3)$$

式中  $\text{erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \exp(-u^2) du$ ,总的误码时隙为

$$P_{se} = P_0 P_{e0} + P_1 P_{e1}, \quad (4)$$

式中  $P_0, P_1$  分别为等概率发送“0”和“1”时,对应的无脉冲时隙和有脉冲时隙的概率,且  $P_0 + P_1 = 1$ 。

定义信噪比为

$$R_{\text{SN}} = \frac{P_{\text{avg}}}{\sigma_n^2}. \quad (5)$$

根据判决理论<sup>[12]</sup>,最佳门限为

$$b = \frac{\sqrt{P_t}}{2} + \frac{\sigma_n^2}{\sqrt{P_t}} \ln \frac{P_0}{P_1}. \quad (6)$$

假设各种调制方式的平均功率  $P_{\text{avg}}$  相等,则它们的峰值功率分别为

$$P_{t,\text{OOK}} = 2P_{\text{avg}}, \quad (7)$$

$$P_{t,\text{ROOK-RZ}} = \frac{2P_{\text{avg}}}{1 + \tau_p}, \quad (8)$$

$$P_{t,\text{RPPM}} = \frac{2^M P_{\text{avg}}}{2^M - 1}, \quad (9)$$

$$P_{t,\text{RDPPM}} = \frac{2P_{\text{avg}}(2^M + 1)}{2^M - 1}, \quad (10)$$

$$P_{t,\text{RDPIM}} = \frac{2P_{\text{avg}}(2^M + 3)}{2^M + 1}. \quad (11)$$

根据(2)~(11)式得各调制方式的误码率为

$$P_{se,\text{OOK}} = 2^{-1} \text{erfc}(2^{-1} R_{\text{SN}}^{1/2}),$$

$$P_{se,\text{ROOK-RZ}} = 2^{-1} \text{erfc}[2^{-1} (1 + \tau_p)^{-1/2} R_{\text{SN}}^{1/2}],$$

$$P_{se,\text{RPPM}} = \frac{(2^M - 1) \text{erfc}[2^{(M+1.5)/2} (2^M - 1)^{-1/2} R_{\text{SN}}^{1/2} - (2^M - 1)^{1/2} 2^{-(M+1/2)/2} \ln(2^M - 1)^{-1} R_{\text{SN}}^{-1/2}]}{2^{M+1}} + \frac{\text{erfc}[2^{(M+1.5)/2} (2^M - 1)^{-1/2} R_{\text{SN}}^{1/2} + (2^M - 1)^{1/2} 2^{-(M+1/2)/2} \ln(2^M - 1)^{-1} R_{\text{SN}}^{-1/2}]}{2^{M+1}},$$

$$P_{se,\text{RDPPM}} =$$

$$\frac{(2^{M-1} - 0.5) \text{erfc}[(2^M + 1)^{1/2} (2^{M+2} - 4)^{-1/2} R_{\text{SN}}^{1/2} - (2^M - 1)^{1/2} (2^{M+2} + 4)^{1/2} \ln(2^{M-1} - 0.5)^{-1} R_{\text{SN}}^{-1/2}]}{2^M + 1} +$$

$$\frac{\text{erfc}[(2^M + 1)^{1/2} (2^{M+2} - 4)^{-1/2} R_{\text{SN}}^{1/2} + (2^M - 1)^{1/2} (2^{M+2} + 4)^{1/2} \ln(2^{M-1} - 0.5)^{-1} R_{\text{SN}}^{-1/2}]}{2^M + 1},$$

$$P_{se, RDPPM} = \frac{(2^{M-1} + 0.5) \operatorname{erfc}[(2^M + 3)^{1/2} (2^{M+2} + 4)^{-1/2} R_{SN}^{1/2} - (2^M + 1)^{1/2} (2^{M+2} + 6)^{1/2} \ln(2^{M-1} + 0.5)^{-1} R_{SN}^{-1/2}]}{2^M + 3} + \frac{\operatorname{erfc}[(2^M + 3)^{1/2} (2^{M+2} + 4)^{-1/2} R_{SN}^{1/2} + (2^M + 1)^{1/2} (2^{M+2} + 6)^{1/2} \ln(2^{M-1} + 0.5)^{-1} R_{SN}^{-1/2}]}{2^M + 3}$$

对于 RPPM,  $P_0 = \frac{1}{2^M}$ ,  $P_1 = \frac{2^M - 1}{2^M}$ ; 对于 RDPPM,  $P_0 = \frac{2}{2^M + 1}$ ,  $P_1 = \frac{2^M - 1}{2^M + 1}$ , 对于 RDPIM,  $P_0 = \frac{2}{2^M + 3}$ ,  $P_1 = \frac{2^M + 1}{2^M + 3}$ 。在最佳门限下, 各调制方式关于信噪比的误时隙率曲线如图 4 所示。可见, 对一种调制方式, 误时隙率随信噪比的增加而减小,  $M$  一定时, RPPM 的误时隙率最小, RDPPM 和 RDPIM 的误时隙率最大。

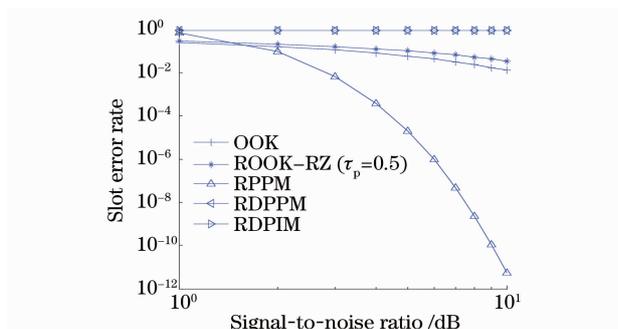


图 4  $M=4$  时, OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM 和 RDPIM 的误时隙率

Fig. 4 Slot error rates of OOK, ROOK-RZ, RPPM, RDPPM and RDPIM when  $M=4$

### 3 结 论

根据可见光通信的特点, 提出了 ROOK-RZ, RPPM, RDPPM 和 RDPIM, 结合 OOK 对比分析了它们的带宽效率、平均发射功率和误时隙率。OOK 调制方式简单, 不需符号同步, 具有最小的带宽需求, 但是平均发射功率不高, 且误时隙率高。RPPM 在相同调制阶数时, 具有最高的平均发射功率, 而且信噪比优于其他方式, 但是具有最大的带宽需求, 同时需要严格的时钟同步。RDPPM 和 RDPIM 的各项性能介于 OOK 和 RPPM 之间。实际工作中, 应充分考虑带宽需求、平均发射功率和误时隙率, 可以根据需要选择合适的调制方式, 以适应未来室内照明可见光通信的要求。

### 参 考 文 献

- 1 Fang Zhilie, Liu Muqing. Technology status of light emitting diodes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 1~7
- 2 方志烈, 刘木清. 半导体照明光源的技术进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(6): 1~7
- 3 Yueqiao Zheng, Minglun Zhang. Visible light communications-recent progresses and future out-looks [C]. *Photonics and Optoelectronic, 2010 Symposium on*. 2010. 1~6
- 4 S. Haruyama. Progress of visible light communication [C]. *Optical Fiber Communication, Collocated National Fiber Optic Engineers Conference*, 2010 Conference on. 2010. 1~3
- 5 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2536~2540
- 6 丁德强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2536~2540
- 7 Wang Jing. Performance Analysis of Wireless Optical Communication Systems Based on PPM and RS [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. 9~22
- 8 王 精. 基于 PPM 和 RS 码的无线光通信系统性能分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009. 9~22
- 9 Huang Aiping, Fan Yangyu, Li Wei *et al.*. Fixed length dual-amplitude pulse interval modulation for optical wireless communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 602~606
- 10 黄爱萍, 樊养余, 李 伟 等. 无线光通信中的定长双幅度脉冲间隔调制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 602~606
- 11 Cheng Gang, Wang Hongxing, Sun Xiaoming *et al.*. Dual pulse-pulse interval modulation for optical wireless communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1750~1755
- 12 程 刚, 王红星, 孙晓明 等. 无线光通信双脉冲间隔调制方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1750~1755
- 13 Cheng Gang, Wang Hongxing, Sun Xiaoming *et al.*. A new modulation scheme of optical wireless communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1914~1918
- 14 程 刚, 王红星, 孙晓明 等. 一种新型的无线光通信调制方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1914~1918
- 15 Hu Guoyong, Chen Changying, Chen Zhenqiang. Study on white LED light source for wireless in-door communications[J]. *Optical Communication Technology*, 2006, **30**(7): 46~48
- 16 胡国永, 陈长缨, 陈振强. 白光 LED 照明光源用作室内无线通信研究[J]. *光通信技术*, 2006, **30**(7): 46~48
- 17 J. M. Kahn, J. R. Barry. Wireless infrared communications [J]. *Proc. IEEE*, 1997, **85**(2): 265~298
- 18 Mao Xinrong, Li Rong. Performance analysis of modulation technology for optical wireless communication[J]. *Communications Technology*, 2009, **42**(3): 54~59
- 19 毛昕蓉, 李 荣. 无线光通信调制技术的性能分析[J]. *通信技术*, 2009, **42**(3): 54~59
- 20 Bernard Sklar. Digital Communications: Fundamentals and Applications, Second Edition[M]. Xu Pingping *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 786~791
- 21 斯克拉. 数字通信-基础与应用(第二版)[M]. 徐平平 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 786~791