

文章编号: 0258-7025(2009)03-0602-05

# 无线光通信中的定长双幅度脉冲间隔调制

黄爱萍 樊养余 李 伟 白 勃

(西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072)

**摘要** 在无线光通信中,为解决脉冲位置调制(PPM)需要符号同步和数字脉冲间隔调制(DPIM)符号长度不固定造成调制器等待或缓冲器溢出的问题,提出了一种新的调制方式——定长双幅度脉冲间隔调制(FDAPIM),分析了它的符号结构、发射功率、带宽需求以及在高斯白噪声下的差错性能,并和开关键控(OOK)、脉冲位置调制(PPM)、数字脉冲间隔调制(DPIM)、定长数字脉冲间隔调制(FDPIM)等调制方式进行了比较。理论分析与仿真结果表明,FDAPIM的误包率劣于PPM和DPIM,接近于FDPIM,但明显优于OOK。虽然FDAPIM的带宽要求较高,但其带宽效率和功率效率都优于FDPIM,且不需要符号同步,相对于PPM系统,实现的复杂性大大简化;相对于DPIM,其符号长度固定,不会引起调制器等待或缓冲器溢出。因此FDAPIM应用于无线光通信系统具有一定优势。

**关键词** 无线光通信; 双幅度脉冲间隔调制; 发射功率; 带宽需求; 误包率; 调制方式

**中图分类号** TN929.1      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/CJL20093603.0602

## Fixed Length Dual-Amplitude Pulse Interval Modulation for Optical Wireless Communications

Huang Aiping Fan Yangyu Li Wei Bai Bo

(School of Electronics Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** In order to solve the problem of symbol synchronization in pulse position modulation (PPM) and modulator waiting or bugger overflow resulting from the unfixed length in pulse interval modulation (DPIM) in optical wireless communications, a novel fixed length dual-amplitude pulse interval modulation(FDAPIM) is discussed. The symbol structure, transmission power, bandwidth requirement and error performance of FDAPIM in a non-dispersive channel are presented and compared with OOK, PPM, DPIM and FDPIM. Simulations show that the packet error rate of FDAPIM is higher than that of PPM and DPIM, which is similar to FDPIM and less than OOK obviously. Moreover, FDAPIM, which does not need symbol synchronization and has fixed symbol length, helps to simplify the receiver and solve the problem of modulator waiting and bugger overflow. It is superior in wireless optical communications system.

**Key words** optical wireless communication; fixed length dual-amplitude pulse interval modulation; transmit power; bandwidth requirement; packet error rate; modulation scheme

## 1 引 言

红外激光具有频率高、频带宽、带宽使用不需要申请、抗电磁干扰能力强、保密性好等优点<sup>[1,2]</sup>,因此,在无线通信系统中的应用日益受到重视。红外

激光通信普遍采用强度调制/直接检测(IM/DD)系统,典型的调制方式有开关键控(OOK)<sup>[3]</sup>、脉冲位置调制(PPM)<sup>[4~6]</sup>、数字脉冲间隔调制(DPIM)<sup>[7~11]</sup>等。OOK是最简单的调制方式,但是

收稿日期: 2008-09-19; 收到修改稿日期: 2008-11-19

基金项目: 重点实验室基金(9140C5301010701)和陕西省自然科学基金(2007F10)资助课题。

作者简介: 黄爱萍(1984—),女,博士研究生,主要从事信号与信息处理、无线光通信的调制解调技术等方面的研究。

E-mail: appleagz1@163.com

导师简介: 樊养余(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信技术、信号处理技术等方面的研究。

E-mail: Fan\_yangyu@sina.com

功率效率比较低。PPM 功率效率高,却增加了带宽要求,且需要符号同步和时隙同步,不利于系统实现。DPIM 不需要符号同步,带宽效率高,但它的符号长度不固定,容易造成调制器缓存溢出或者加入空时隙,使得解调器不能正确解调<sup>[12]</sup>。因此数字脉冲间隔调制实现也不容易。文献[12]中提出的定长数字脉冲间隔调制(FDPIM),虽然实现符号长度固定,但它的带宽效率和功率效率都较低。本文结合数字脉冲间隔调制和脉冲位置调制提出了定长双幅度脉冲间隔调制(FDAPIM)。研究了采用 FDAPIM 方式的红外通信系统的符号结构、发射功率、带宽需求和差错性能,并与 PPM, DPIM, FDPIM 等调制方式进行了仿真比较。

## 2 符号结构

定长双幅度脉冲间隔调制采用两种脉冲,其幅度分别为  $A$  和  $\beta A$  ( $0 < \beta < 1$ ), 将一个二进制的  $M$  ( $M$  表示每个符号所包含的比特数) 位数据组映射为  $2^M + 3$  个时隙组成的时间段上的双脉冲信号。令  $k$  为符号所表示的十进制, 每个符号的起始位置为  $A$  脉冲, 后加一个保护时隙, 然后加上  $k$  个空时隙表示信息, 后加上  $\beta A$  脉冲, 再加  $2^M - k$  个空时隙。OOK, PPM, DPIM, FDPIM 及 FDAPIM 五种调制方式的符号波形如图 1 所示。其中设置的保护时隙是为了防止符号中或符号间出现连续的多个脉冲,  $\beta A$  脉冲标志本符号后面的空时隙为补充时隙, 并不表示信息。在解调时, 当判断收到  $A$  脉冲时, 则数其后面的空时隙个数直到判断收到  $\beta A$  脉冲时停止, 然后将所记空时隙个数减去 1 就可完成解调。因此, 定长双幅度脉冲间隔调制不需要符号同步。

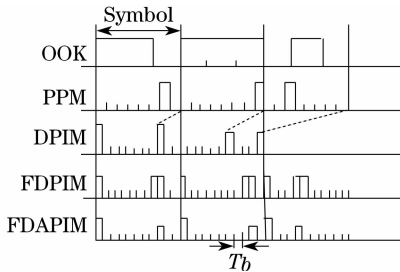


图 1 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 及 FDAPIM 的编码结构

Fig. 1 Symbol structure of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and FDAPIM

信息比特和 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 及 FDAPIM 等调制方式的时隙序列如表 1 所示。

表 1 信息比特和 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 及 FDAPIM 等调制方式的时隙序列对照

Table 1 Examples of mappings between source bits

		and transmitted chips			
Source bits	OOK	4-PPM	4-DPIM	4-FDPIM	4-FDAPIM
00	00	1000	1	10110000	10 $\beta$ 0000
01	01	0100	10	10011000	100 $\beta$ 0000
10	10	0010	100	10001100	1000 $\beta$ 00
11	11	0001	1000	10000110	10000 $\beta$ 0

### 2.1 发射功率

考虑 5 种调制方式在误码率(BER)相同条件下的平均发射功率, 从调制方式的表达式中可以推算出在相同误码率下各种调制方式所需要的功率。为了简化模型, 假设用调制信号星座图中有效调制信号之间的最短距离, 即欧几里德距离来计算误码率<sup>[13]</sup>

$$\text{BER} = Q[d_{\min}/(2\sqrt{N_0})], \quad (1)$$

其中  $d_{\min}$  为有效调制信号间的最小欧几里德距离,

$$N_0 \text{ 为噪声功率谱密度, } Q(x) = \sqrt{2\pi} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt.$$

$$d_{\min}^2 = \min_{i \neq j} \int [X_i(t) - X_j(t)]^2 dt, \quad (2)$$

式中  $X(t)$  表示输入信号的光功率。OOK 调制的最小欧几里德距离  $d_{\text{OOK}}$  为  $2P/\sqrt{R_b}$ , 误码率为  $Q[P/(R_b\sqrt{N_0})]$ , 则在误码率一定的条件下 OOK 的发射功率  $P_{\text{OOK}}$  为

$$P_{\text{OOK}} = \sqrt{N_0 R_b} Q^{-1}(\text{BER}), \quad (3)$$

其中  $R_b$  为比特速率。FDAPIM 在相同误码率下的功率与 OOK 调制的关系可以近似为

$$\frac{P_F}{P_{\text{OOK}}} \approx \frac{d_{\text{OOK}}}{d_{\min}}, \quad (4)$$

由于 FDAPIM 调制的欧几里德距离为

$$d_F = P \sqrt{2(2^M + 3)(1 + \beta^2)M/R_b} / (1 + \beta), \quad (5)$$

其中  $P$  为平均功率。

因此, FDAPIM 调制相对于 OOK 调制的归一化功率为

$$\frac{P_F}{P_{\text{OOK}}} \approx \frac{d_{\text{OOK}}}{d_F} = (1 + \beta) \sqrt{\frac{2}{(2^M + 3)(1 + \beta^2)M}}, \quad (6)$$

同理,  $P_{\text{PPM}} = \sqrt{2/2^M} MP_{\text{OOK}}$ ,

$$P_{\text{DPIM}} = \frac{\sqrt{8 \times (2^M + 1)M}}{(2^M + 3)P_{\text{OOK}}}, \quad (7)$$

$$P_{\text{FDPIM}} = \sqrt{6/M/(2^M + 4)}.$$

图 2 表示各种调制方式在相同误码率时的发射功率,可以看出 FDAPIM 的发射功率明显低于 OOK, DPIM 和 FDPIM,但高于 PPM。当  $M = 4$  时,FDAPIM 的发射功率较 OOK 约降低 6.6 dB,较 DPIM 约降低 1.5 dB,较 FDPIM 约降低 1 dB,较 PPM 约高出 1 dB。

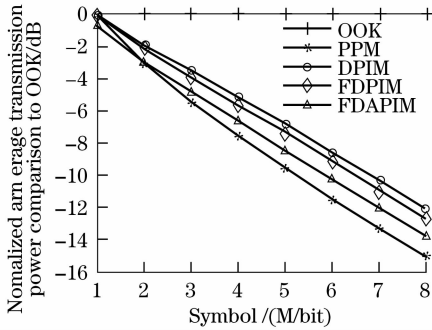


图 2 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 及 FDAPIM 的发射功率

Fig. 2 Transmission powers of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and FDAPIM

## 2.2 带宽需求

在光通信中,激光器通常工作于脉冲状态<sup>[4]</sup>,脉冲持续时间为  $\tau$ ,相应的带宽  $B = 1/\tau$ ,当占空比为  $\tau_p = 1$  时,  $B = 1/T_b$  (Hz) ( $T_b$  表示时隙宽度)。对于 OOK 调制信号,设码元占空比为 1(以下分析均采用此占空比),比特速率为  $R_b$  (bit/s),则所占带宽约为脉冲持续时间的倒数  $R_b$ 。对于定长双幅度脉冲间隔调制,  $M$  位比特平均脉冲宽度为:  $T_F = 1/(2^M + 3)T_s$  ( $T_s$  表示  $M$  位比特的时隙长度),则在相同的平均比特率时,其所需要的带宽为

$$B_F = 1/T_F = (2^M + 3)R_b/M \quad (8)$$

同理可求出 PPM, DPIM, FDPIM 等调制方式的带宽。图 3 表示 PPM, DPIM, FDPIM, FDAPIM 等调制方式按照 OOK 做归一化处理后的带宽。其中当  $M = 4$  时, DPIM, PPM, FDPIM 和 FDAPIM 的带宽分别为 OOK 的 2.4 倍, 4 倍, 5 倍和 4.75 倍。可见 FDAPIM 比 FDPIM 的带宽需求略低;相对于 PPM 调制, FDAPIM 的每个符号多增加了两个保护时隙和一个脉冲,故其带宽需求较 PPM 有所增加,但随着  $M$  的增大,两者带宽近似相等。

## 3 差错性能分析

### 3.1 室内无线光通信系统信道模型

室内无线光通信环境中,主要噪声是由太阳光、灯光等多种背景光在接受探测器中造成的散弹噪声,但通常背景光强远大于信号光强,所以可以认为

散弹噪声独立于发射信号。此外还有光电探测器带来的暗电流噪声和漏电流噪声及电阻的热噪声,这些噪声也都独立于发射信号。所以系统噪声可以看作独立于发射信号的高斯白噪声<sup>[14,15]</sup>。

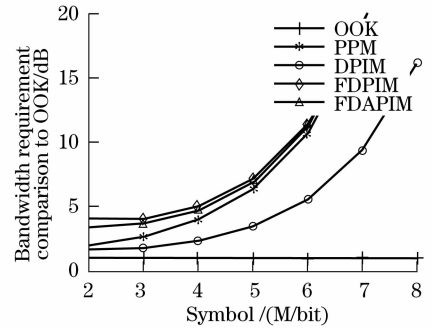


图 3 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 及 FDAPIM 的带宽需求

Fig. 3 Bandwidth requirements of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and FDAPIM

在建立系统模型推导 FDAPIM 的差错率时,假设信道为理想信道,即不存在多径效应,脉冲响应函数  $h(t)$  为  $\delta(t)$ ,发射机和接收机前端带宽足够。系统模型如图 4 所示。可以看出,信息序列  $a_k = \{0, 1\}$  通过编码器,  $c_k$  为已调制的序列,以  $1/T_b$  的速率通过发射滤波器,其脉冲响应函数为  $Ac(t)$ 。然后通过脉冲响应函数为  $h(t)$  的信道,加上双边功率谱密度为  $N_0/2$  的高斯白噪声,再通过脉冲响应为  $g(t)$  的接收滤波器。然后对此信号进行取样,得到估计值  $\hat{c}_k$ ,经过解码器得到  $\hat{a}_k$ 。这里  $A = RP_t$ ,其中  $R$  是探测器响应率,  $P_t$  为信号峰值光功率。

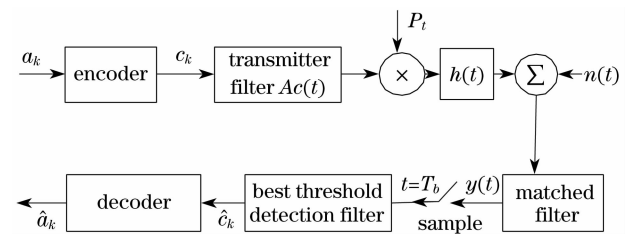


图 4 信道模型

Fig. 4 Channel model

### 3.2 误码率推导

在平均功率相同的情况下,不同的调制方式有不同的峰值功率。设平均功率为  $P$ ,各调制方式所需要的峰值功率为

$$P_{t,OOK} = 2P, P_{t,PPM} = 2^M P, P_{t,DPIM} = \frac{2^M + 3}{2} P, \\ P_{t,FDPIM} = \frac{2^M + 4}{2} P, P_{t,F} = \frac{2^M + 3}{1 + \beta} P, \quad (9)$$

令  $p_0$  表示接收到 0 的概率,  $p_1$  表示接收到  $A$  的概率,  $p_\beta$  表示接收到  $\beta A$  的概率。则时隙出错的概率为

$$P_s = p_0 Q\left[\frac{\theta_1 A}{\sqrt{N_0/(2T_b)}}\right] + p_1 Q\left[\frac{(1-\theta_2)A}{\sqrt{N_0/(2T_b)}}\right] + p_1 Q\left[\frac{(\beta-\theta_1)A}{\sqrt{N_0/(2T_b)}}\right] + p_1 Q\left[\frac{(\theta_2-\beta)A}{\sqrt{N_0/(2T_b)}}\right], \quad (10)$$

其中  $\theta_1 A$  和  $\theta_2 A$  为门限,  $p_0 = (L_{\text{avg}} - 2)/L_{\text{avg}}$ ,  $p_1 = 1/L_{\text{avg}}$ ,  $p_\beta = 1/L_{\text{avg}}$ ,  $L_{\text{avg}}$  为每符号的平均时隙数。假设信噪比<sup>[15]</sup>为

$$\text{SNR} = P/P_N = \frac{\sqrt{2T_b}PR}{\sqrt{N_0}}, \quad (11)$$

$P_N$  为噪声功率, 则 OOK 的信噪比为

$$\text{SNR}_0 = \frac{\sqrt{2}PR}{\sqrt{N_0}R_b}, \quad (12)$$

将(12)式带入(10)式可得

$$P_s = 1/L_{\text{avg}} \{ (L_{\text{avg}} - 2)Q(\theta_1 D) + Q[(1 - \theta_2)D] + Q[(\beta - \theta_1)D] + Q[(\theta_2 - \beta)D] \}, \quad (13)$$

其中  $D = \sqrt{M(2^M + 3)}/(1 + \beta)\text{SNR}_0$ 。

因为 DPIM 的时隙个数不固定, 意味着如果一个符号发生错误, 则会影响后续符号的判决。所以不仅要考虑误时隙率, 还要考虑误包率。假定只要检测到包中的一个比特错误, 就认为这个包有错误。则误包率为

$$P_p = 1 - (1 - P_s)^{NL_{\text{avg}}/M} \approx NL_{\text{avg}}P_s/M, \quad (14)$$

式中  $N$  为每一包的比特数,  $N/M$  为每包的符号数。

将(13)式代入(14)式中, 可得

$$P_p = NP_s/M \{ (L_{\text{avg}} - 2)Q(\theta_1 D) + Q[(1 - \theta_2)D] + Q[(\beta - \theta_1)D] + Q[(\theta_2 - \beta)D] \}. \quad (15)$$

### 3.3 仿真和分析

对于  $M \in \{3, 4, 5, 6\}$ , FDAPIM 的误包率随信噪比的变化如图 5 所示, 其中  $M = 4$ ,  $N = 1024$ ,  $\beta = 1/2$ ,  $\theta_1 = 1/4$ ,  $\theta_2 = 3/4$ 。从图中可以看出, 误包率随着  $M$  的增加迅速下降, 当信噪比为 6 dB 时,  $M$  每增加 1, 误包率下降约 4 个数量级; 当误包率为  $10^{-6}$  时,  $M$  每增加 1,  $\text{SNR}_0$  降低 1.7 dB。

OOK, PPM, DPIM, FDPIM, FDAPIM 等调制方式随信噪比的误包率曲线如图 6 所示, 由于双脉冲使得峰值功率和均值比下降, FDAPIM 的误包率性能与 FDPIM 接近, 劣于 PPM 和 DPIM, 但明显优于 OOK。当误包率为  $10^{-6}$  时, 对于  $\text{SNR}_0$ , FDAPIM 比 OOK 降低了 1.5 dB; 当  $\text{SNR}_0$  为 6 dB 时, OOK 的误包率为 0.0174, 而 FDAPIM 的误包率为  $1.86 \times 10^{-5}$ 。

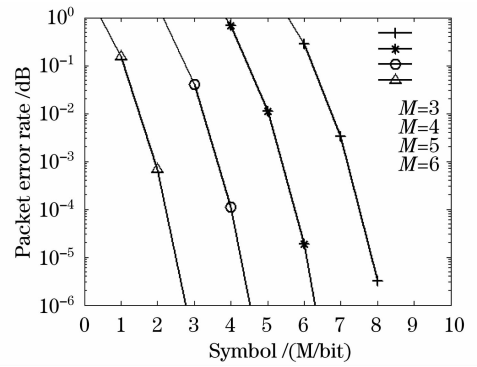


图 5 不同  $M$  值下 FDAPIM 的误包率

Fig. 5 Packet error rate of FDAPIM for different  $M$

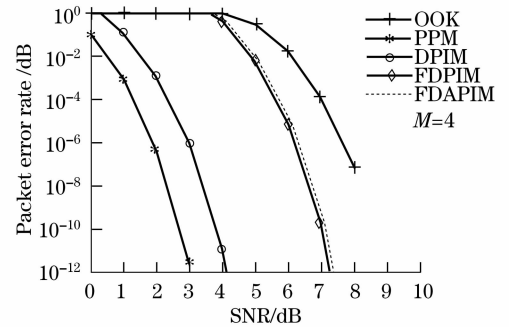


图 6 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 及 FDAPIM 的误包率

Fig. 6 Packet error rate of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and FDAPIM

## 4 结 论

提出了一种新的调制方式——定长双幅度脉冲间隔调制方式。研究了其符号结构、发射功率、带宽需求以及差错性能, 并通过仿真与 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 等调制方式进行比较。结果表明, 与 OOK, DPIM 和 FDPIM 比较, FDAPIM 有较好的功率效率; 带宽需求较高, 但低于 FDPIM; 误包率与 FDPIM 接近, 高于 PPM 和 DPIM, 但明显低于 OOK。FDAPIM 克服了 DPIM 调制符号长度不固定所引起调制器等待或缓冲器溢出的问题; 相对于 PPM, FDAPIM 在接收端只需要时隙同步, 不需要符号同步, 大大简化了接收机的设计, 更易于实现。因此 FDAPIM 是无线光通信中一种较好的调制方式。

## 参 考 文 献

- 1 J. M. Kahn, J. R. Barry. Wireless infrared communications [J]. *Proc. IEEE*, 1997, 85(2): 265~298
- 2 Yang Wenjun, Hu Yu. Performance of high-speed wireless infrared indoor communications [J]. *Wireless Optical Communications*, 2003, (3): 42~45

- 杨文浚, 胡 渝. 高码率无线红外室内传输系统的通信性能[J]. 无线光通信, 2003, (3):42~45
- 3 Pang Zhiyong, Piao Dazhi, Zou Chuanyun. Performance comparisons of several modulation schemes for optical wireless communication[J]. *Journal of Guilin Institute of Electronic Technology*, 2002, **22**(5):1~4
- 庞志勇, 朴大志, 邹传云. 光通信中几种调制方式的性能比较[J]. 桂林电子工业学院学报, 2002, **22**(5):1~4
- 4 Wang Jingyuan, Zhang Zhengxian. PPM in wireless infrared communication[J]. *Telecommunication Engineering*, 2000, **5**:81~84
- 汪井源, 张正线. 无线光通信的 PPM 调制[J]. 电讯技术, 2000, **5**:81~84
- 5 Wu Jili, Zhao Shanghong, Xu Jie *et al.*. Study of capacity of coherent pulse-position modulation channel and maximization of information transmitting rate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):643~647
- 吴继礼, 赵尚弘, 胥 杰等. 相干光脉冲位置调制信道容量及传信率最大化研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(4):643~647
- 6 Y. Y. Fan, R. J. Green. Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(6):1~8
- 7 Wang Hongxing, Zhu Yinbing, Zhang Tiejun *et al.*. Performance study of modulation for analyses for optical wireless communications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6):38~41
- 王红星, 朱银兵, 张铁英等. 无线光通信调制方式性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(6):38~41
- 8 Hu Zongmin, Tang Junxiang. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communications[J]. *Journal on Communications*, 2005, **26**(3):75~79
- 胡宗敏, 汤俊雄. 大气无线光通信系统中数字脉冲间隔调制研究[J]. 通信学报, 2005, **26**(3):75~79
- 9 Wang Hongxing, Zhu Yinbing, Zhang Tiejun *et al.*. Performance study of optical wireless DH-PIM and DPIM[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(1):92~94
- 王红星, 朱银兵, 张铁英等. 无线光 DH-PIM 与 DPIM 调制方式的性能研究[J]. 激光技术, 2007, **31**(1):92~94
- 10 Z. Ghassemlooy, A. R. Hayes, B. Wilson. Reducing the effects of intersymbol interference in diffuse DPIM optical wireless communications[J]. *Proc. IEEE*, 2003, **150**(5):445~452
- 11 Zhu Yinbing, Wang Hongxing, Zhang Lei *et al.*. Analysis of error performance for turbo coded digital pulse interval modulation under weak turbulence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1245~1249
- 朱银兵, 王红星, 张 磊等. 弱湍流下 Turbo 码编码数字脉冲间隔调制差错性能分析[J]. 中国激光, 2007, **34**(9):1245~1249
- 12 Zhang Tiejun, Wang Hongxing, Cheng Gang *et al.*. A novel fixed length digital pulse interval modulation for optical wireless communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1655~1659
- 张铁英, 王红星, 程 刚等. 无线光通信中的定长数字脉冲间隔调制[J]. 中国激光, 2007, **34**(12):1655~1659
- 13 Jinlong Zhang. Modulation analysis for outdoors applications of optical wireless communications[J]. *Proc. IEEE*, 2000, **2**:1483~1487
- 14 Yang Wenjun, Hu Yu. Mitigating the noise in high-speed wireless infrared indoor communications [J]. *Wireless Optical Communication Technology*, 2003, (3):30~32
- 杨文浚, 胡 渝. 高码率无线红外室内传输系统的噪声抑制[J]. 无线光通信技术, 2003, (3):30~32
- 15 Zhang Kai. Dual-amplitude pulse interval modulation for optical wireless communications and optical ETC prototype[D]. Beijing: Dissertation of Tsinghua University for the Doctor Degree of Engineering, 2004. 21~27
- 张 凯. 无线光通信双幅度数字脉冲间隔调制研究及其在光波 ETC 中的应用[D]. 北京:清华大学工学博士学位论文, 2004. 21~27