

文章编号: 0258-7025(2010)07-1772-05

无线光 FDAPIM-CDMA 系统性能分析

黄爱萍 樊养余 李 伟 王凤琴

(西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710129)

摘要 在无线光通信中,为了提高系统的性能,提出了一种新的定长双幅度数字脉冲间隔调制-码分多址方式(FDAPIM-CDMA)。分析了采用光正交码时,它在多用户同步和理想异步干扰下的误码率(BER)特性,并给出了误码率上限和下限的数学表达式。研究了码长、码重、用户总数以及接收门限对系统性能的影响,并在相同情况下与开关键控码分多址(OOK-CDMA)系统的性能进行了比较。理论分析与仿真结果表明,FDAPIM-CDMA 系统的误码率性能随码长的增大、用户数量的减少而提高。对于过长的码重,可通过增加接收门限值来降低误码率。当符号比特数大于等于 6 且门限值等于码重时,FDAPIM-CDMA 的误码率上限和下限均比 OOK-CDMA 小,具有较强的抗多用户干扰能力。因此 FDAPIM-CDMA 可作为 OOK-CDMA 的一个有效的替代方式。

关键词 无线光通信;FDAPIM-CDMA;误码率上限/下限;多用户干扰;光正交码

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1772

Performance Analysis of Optical Wireless FDAPIM-CDMA Systems

Huang Aiping Fan Yangyu Li Wei Wang Fengqin

(School of Electronics Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China)

Abstract In order to improve the performance of optical wireless communication system, a novel fixed length dual-amplitude pulse interval modulation-code division multiple access (FDAPIM-CDMA) is proposed. With the optical orthogonal codes (OOC), the bit error rate (BER) of the proposed system in chip synchronous interference and ideal chip asynchronous interference are analyzed respectively. The upper and lower bounds on BER are derived as a function of code length, code weight, number of users, and receiver threshold. The characteristics for a variety of system parameters are discussed and compared with on-off keying-code division multiple access (OOK-CDMA). Simulations show that the BER performance of the proposed system can be improved by longer code length and smaller number of users. It is effective to get the threshold level higher to improve the system performance when the code weight is larger. Moreover, both the upper and lower bounds on BER of FDAPIM-CDMA are lower than those of OOK-CDMA when the bits per symbol are not less than 6. Hence, FDAPIM-CDMA plays good performance in multi-user interference and is superior in wireless optical communications system.

Key words optical wireless communication; fixed length dual-amplitude pulse interval modulation-code division multiple access; upper/lower bound on BER; multi-user interference; optical orthogonal codes

1 引 言

红外激光通信系统以激光光束为载波在大气中传送数据、语音和图像等信号,具有无电磁干扰、无需带宽申请、保密性好和组网机动灵活等优点,在解

决“最后一千米”问题上发挥了重要的作用^[1],其中调制技术是决定无线光通信系统性能优劣的主要因素之一^[2,3]。定长双幅度脉冲间隔调制(FDAPIM)结合脉冲位置调制(PPM)和脉冲间隔调制(DPIM)

收稿日期: 2009-11-24; 收到修改稿日期: 2009-12-14

基金项目: 空间微波技术国家级重点实验室基金项目(9140C5301010701)和陕西省自然科学基金项目(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、无线光通信系统的关键技术等方面的研究。

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

的优点,采用两种幅度脉冲,有效地克服了 PPM 系统需要符号同步和 DPIM 长度不固定导致调制器等待或缓冲器溢出的问题^[4]。仿真实验表明,这种新的调制方式性能优越,具有很高的实际应用价值。多址技术是光通信系统中需要考虑的另一个重要因素。码分多址(CDMA)技术抗干扰性强、系统容量大、保密性好且支持异步通信^[5],近年来又进一步发展出适合红外无线光通信系统的光 CDMA 技术^[6~8]。

本文基于 FDAPIM 和 CDMA 技术提出了一种新的无线光 FDAPIM-CDMA 系统,研究了采用光正交码^[9~11]的 FDAPIM-CDMA 多址方式的系统结构,分析了同步以及理想异步干扰下的概率分布密度,并推导了误码率(BER)上限和下限的表达式,研究了码长、码重、用户总数以及接收门限对系统性能的影响,并通过仿真与开关键(OOK)-CDMA^[12,13]多址方式进行了比较分析。

2 系统模型

FDAPIM-CDMA 系统模型如图 1 所示,假设信道为理想信道,系统由 N 组发射器和接收器构成,且 N 对发射信号功率相同,互不相关,即性能损

耗只与用户干扰有关。其中信息序列 $a_k = \{0, 1\}$, $k=1, 2, \dots, M$ 通过 FDAPIM 调制器,映射为 2^M 个不同的 FDAPIM 符号,时隙周期为 T_s ,再通过 CDMA 编码器,每个脉冲被长度为 F ,码重为 K 的光正交码(OOC)序列(其编码结构如图 2 所示)所扩展,码片周期为 T_c ,则第 $n(1 \leq n \leq N)$ 个发射器发出的信号为

$$S_n(t) = x_n(t)A_n(t), \quad (1)$$

式中 $x_n(t)$ 为经调制后的信号, $A_n(t)$ 为第 n 个 OOC

$$A_n(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j^{(n)} P_{T_c}(t - jT_c), \quad (2)$$

式中 P_{T_c} 是周期为 T_c 的矩形脉冲, $T_c = T_s/F$, $a_{j+r}^{(n)} = a_j^{(n)}$ 且 $a_j^{(n)} \in \{0, 1\}$ 。假设发射器各发射信号未同步,则接收信号为

$$r(t) = \sum_{n=1}^N S_n(t - \tau_n), \quad (3)$$

式中 τ_n 为第 n 组信号的时延。假设第一组信号为目标信号,且 $\tau_1 = 0$,则第一个接收机的相关器输出为

$$Z_1 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_s} r(t) A(t) dt = b_0^{(1)} K + I_1, \quad (4)$$

式中 $b_0^{(1)} K$ 为目标信号, I_1 为总的多用户干扰。

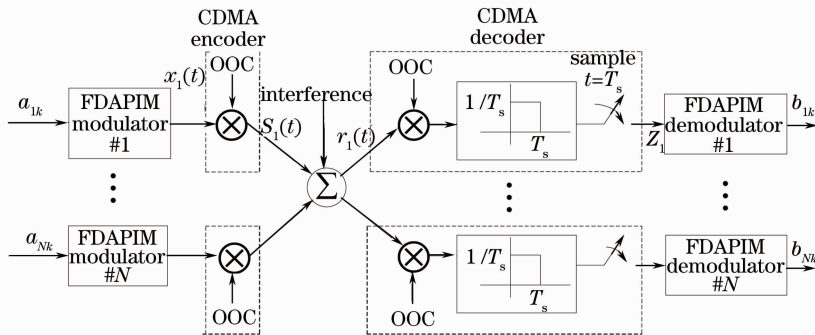


图 1 FDAPIM-CDMA 系统模型

Fig. 1 FDAPIM-CDMA system model

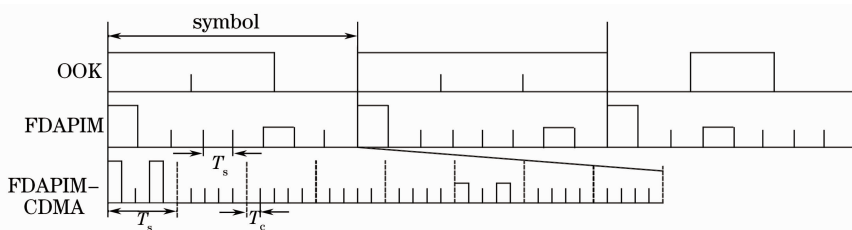


图 2 OOK, FDAPIM 和 FDAPIM-CDMA 的编码结构

Fig. 2 System structures of OOK, FDAPIM, and FDAPIM-CDMA

3 多用户干扰下的密度函数

为了便于分析误码率特性,主要考虑两种情况

的干扰密度函数:1)同步干扰;2)理想的异步干扰(即任意两 OOC 之间不存在相连脉冲的情况)。根

据各变量之间的关系可以得出同步情况下的误码率 P_{eA} 为实际误码率 P_{ec} 的上限,理想异步情况下的误码率为实际误码率的下限^[14,15],即

$$P_{eB} \leq P_{ec} < P_{eA}. \quad (5)$$

采用文献[14]提出的光盘法可以得到第 n 个发射信号对第一个接收器的干扰密度函数为

$$P_{I_1^{(n)}} [I_1^{(n)}] = \left[1 - (p_1 + p_\beta) \frac{K^2}{F} \right] \delta [I_1^{(n)}] + p_1 \frac{K^2}{F} \delta [I_1^{(n)} - 1] + p_\beta \frac{K^2}{F} \delta [I_1^{(n)} - \beta], \quad (6)$$

式中 $I_n^{(1)}$ 为第 n 组发射信号对第一个接收器的干扰, p_1, p_β 分别为“1”和“ β ”出现的概率,且由文献[4]可得 $p_1 = p_\beta = 1/(2^M + 3)$, M 为每符号所包含的比特数.因此总干扰信号 I_1 为 $(N - 1)$ 个独立随

机分布的干扰信号 $I_n^{(1)} (2 \leq n \leq N)$ 组成.假设概率密度函数 $P_{I_1} (I_1)$ 为 $(N - 1)$ 个 $I_n^{(1)}$ 的概率密度函数的卷积,则同步情况下总的干扰密度函数为

$$P_{I_1} (I_1) = \sum_{i=0}^{N-1} C_{N-1}^i \left(p_1 \frac{K^2}{F} \right)^i \sum_{j=0}^{N-1-i} C_{N-1-i}^j \left(p_\beta \frac{K^2}{F} \right)^j \times \left[1 - (p_1 + p_\beta) \frac{K^2}{F} \right]^{N-1-i-j} \delta (I_1 - i - j\beta), \quad (7)$$

同理可得理想异步情况下第 n 组发射信号对第一个接收器的干扰密度函数为

$$P_{I_1^{(n)}} [I_1^{(n)}] = \left[1 - 2(p_1 + p_\beta) \frac{K^2}{F} \right] \delta [I_1^{(n)}] + (p_1 + p_\beta) \left\{ f_0 [I_1^{(n)}] + f_0 \left[\frac{1}{\beta} I_1^{(n)} \right] \right\}, \quad (8)$$

则理想异步情况下总的干扰密度函数为

$$P_{I_1} (I_1) = q^{N-1} \delta (I_1) + (N - 1) p q^{N-2} \left[f_0 \left(\frac{1}{\beta} I_1 \right) + f_0 (I_1) \right] + C_{N-1}^2 p^2 q^{N-3} [f_1 (I_1) + 2f_2 (I_1) + f_3 (I_1)] + \sum_{i=3}^{N-1} C_{N-1}^i p^i q^{N-1-i} \sum_{j=0}^i C_i^j G \left[\frac{j + (i-j)\beta}{2}, \frac{j + (i-j)\beta^2}{12} \right], \quad (9)$$

式中 $G(\mu, \sigma^2)$ 是均值为 μ , 方差为 σ^2 的高斯密度函数, $p = (p_1 + p_\beta) (K^2/F)$, $q = 1 - 2p = 1 - 2(p_1 + p_\beta) \times (K^2/F)$, 函数 $f_0(x), f_1(x), f_2(x)$ 和 $f_3(x)$ 分别为

$$f_0(x) = \begin{cases} 1, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$f_1(x) = \begin{cases} 1 - |x - 1|, & 0 \leq x \leq 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$f_2(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \beta \\ \beta, & \beta \leq x \leq 1 \\ 1 + \beta - x, & 1 \leq x \leq 1 + \beta \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$f_3(x) = \begin{cases} \beta - |x - \beta|, & 0 \leq x \leq 2\beta \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

4 误码率分析

FDAPIM-CDMA 的误码率可以定义为

$$P_e = P_r [Z_1 \geq T_\beta | b_0^{(1)} = 0] P_r [b_0^{(1)} = 0] + P_r [Z_1 < T_\beta | b_0^{(1)} = \beta] P_r [b_0^{(1)} = \beta] + P_r [Z_1 \geq T_1 | b_0^{(1)} = \beta] P_r [b_0^{(1)} = \beta] + P_r [Z_1 < T_1 | b_0^{(1)} = 1] P_r [b_0^{(1)} = 1], \quad (14)$$

式中 T_β 和 T_1 为判决门限,且满足 $0 \leq T_\beta \leq \beta K, 0 \leq T_1 \leq K$. 由于 P_r 为非负信号的概率,因此 $P_r [Z_1 < T_\beta | b_0^{(1)} = \beta] = P_r (\beta K + I_1 - T_\beta < 0) = 0, P_r [Z_1 < T_1 | b_0^{(1)} = 1] = P_r (K + I_1 - T_1 < 0) = 0$, 实际

误码率为

$$P_{ec} = p_0 \int_{T_\beta}^{\infty} P_{I_1} (I_1) dI_1 + p_\beta \int_{T_1 - K\beta}^{\infty} P_{I_1} (I_1) dI_1, \quad (15)$$

式中 p_0 为“0”出现的概率,由文献[4]可得 $p_0 = (2^M + 1)/(2^M + 3)$, 因此将(7)式代入(15)式可得同步干扰下的误码率为

$$P_{eA} = p_0 \sum_{i=0}^{N-1} C_{N-1}^i \left(p_1 \frac{K^2}{F} \right)^i \sum_{j=0}^{N-1-i} C_{N-1-i}^j \times \left(p_\beta \frac{K^2}{F} \right)^j \left[1 - (p_1 + p_\beta) \frac{K^2}{F} \right]^{N-1-i-j}, \quad (16)$$

式中

$$J = \max \left(\frac{T_\beta - K\beta - i}{\beta}, 0 \right) = \begin{cases} \frac{T_\beta - K\beta - i}{\beta}, & T_\beta - K\beta - i \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

图 3 表示在同步干扰下,FDAPIM-CDMA 系统的误码率随判决门限的变化.图 3(a)为 $\beta = 0.5, T_\beta = \beta T_1$ (下同), $M = 4, N = 20, K = 5, F = 1000, 2000$ 和 3000 时 FDAPIM-CDMA 系统的误码率.可以看出,当码长增加时,系统的误码率下降,如当 $T_1 = 5$ 时, $F = 1000, 2000, 3000$ 的系统误码率分别为 $8.18 \times 10^{-6}, 1.03 \times 10^{-6}, 3.08 \times 10^{-7}$. 图 3(b)为取 $M = 4, N = 20, F = 1000, K = 3, 5, 7$ 时系统的误码率.可以看出,当码重增加时,系统误码率升

高,但可以通过增加判决门限来提高系统的性能,例如取 $K=7, T_1=4$ 时的系统误码率为 5.96×10^{-3} ; $K=7, T_1=7$ 时系统的误码率为 7.82×10^{-7} , 相对于取 $K=7, T_1=4$ 系统的误码率降低了 4 个数量级。图 3(c) 为取 $M=4, K=5, F=1000, N=20$,

40, 60 时系统的误码率。可以看出,当用户数 N 增加时,系统的误码率上升,例如当 $T_1=5$ 时, $N=20, 40, 60$ 的系统误码率分别为 $8.18 \times 10^{-6}, 7.5 \times 10^{-5}, 2.59 \times 10^{-4}$ 。同理可得理想异步干扰下的误码率为

$$P_{eB} = p_0 \int_{T_\beta}^{\infty} C_{N-1}^2 p^2 q^{N-3} [f_1(I_1) + 2f_2(I_1) + f_3(I_1)] dI_1 + p_1 \int_{T_1 - \beta K}^{\infty} C_{N-1}^2 p^2 q^{N-3} [f_1(I_1) + 2f_2(I_1) + f_3(I_1)] dI_1 + \sum_{i=3}^{N-1} C_{N-1}^i p^i q^{N-1-i} \sum_{j=0}^i C_i^j \left\{ p_0 Q \left\{ \frac{T_\beta - [j + (i-j)\beta]/2}{\sqrt{[j + (i-j)\beta^2]/12}} \right\} + p_\beta Q \left\{ \frac{T_1 - K\beta - [j + (i-j)\beta]/2}{\sqrt{[j + (i-j)\beta^2]/12}} \right\} \right\}, \quad (17)$$

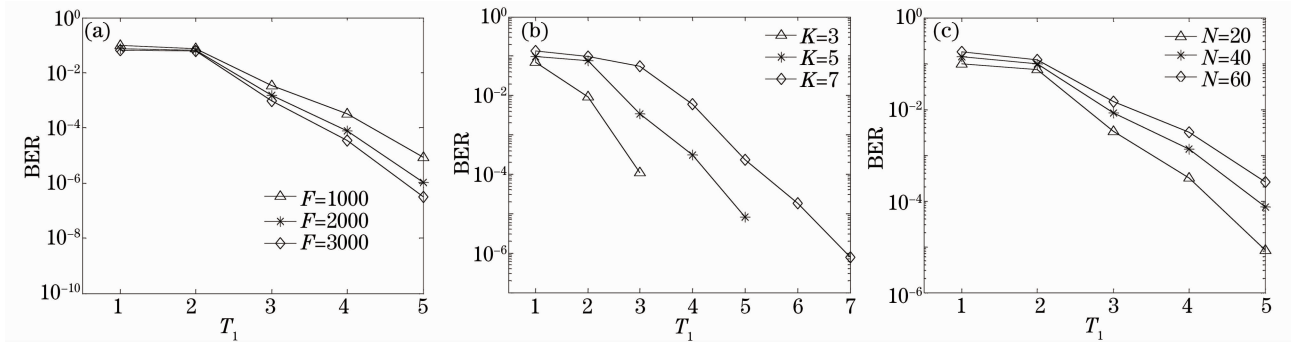


图 3 误码率上限值

Fig. 3 Upper bound on BER performance

式中 $Q(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^{\infty} \exp(-t^2/2) dt$ 。

图 4 为在理想异步干扰下,取 $M=4, N=20, F=1000, K=3, 5, 7$ 时 FDAPIM-CDMA 的系统误码率随判决门限的变化。由图可见,理想异步干扰下系统性能明显优于同步干扰,例如当 $T_1=5, K=5, 7$ 时,系统误码率分别为 $5.41 \times 10^{-7}, 3.97 \times 10^{-5}$, 较同步干扰分别低了 1~2 个数量级。此外,与同步干扰情况类似,对于更大的码重,也可通过增大门限来提高理想异步干扰下的系统性能。

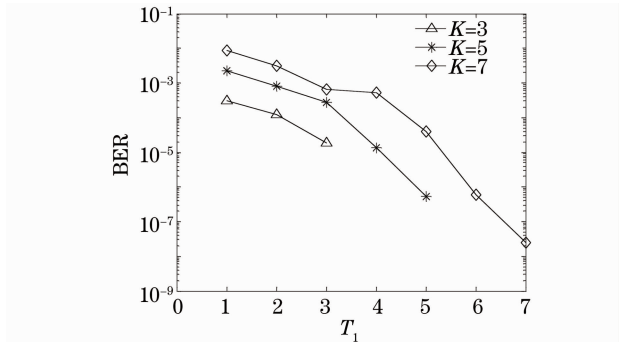


图 4 误码率下限值

Fig. 4 Lower bound on BER performance

图 5, 图 6 分别表示经 OOK-CDMA 归一化后 FDAPIM-CDMA 系统的误码率上限值和下限值,其中取 $F=1000, N=20, K=5, M=4, 5, 6, 7, 8$ 。可以看出当 M 变大时,误码率上下限值均降低,且对于 $M \geq 6, T_1 = K$, FDAPIM-CDMA 的误码率上限值和下限值均小于 OOK-CDMA。例如 $M=6$ 时, FDAPIM-CDMA 的误码率上限值约为 OOK-CDMA 的 12.8%, 下限值约为 OOK-CDMA 的 84.8%, 且 M 值越大,减小量越大。

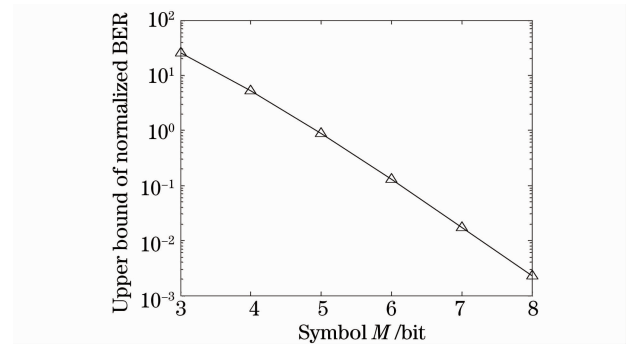
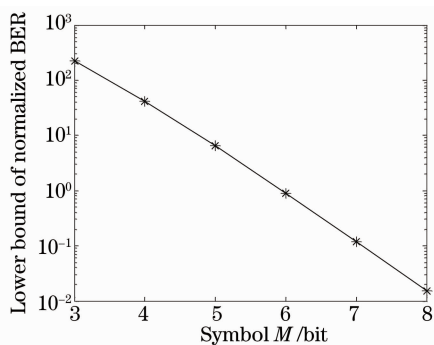


图 5 不同 M 时归一化的误码率上限值

Fig. 5 Upper bound of normalized BER for different M

图 6 不同 M 时归一化的误码率下限值Fig. 6 Lower bound of normalized BER for different M

5 结 论

提出了一种新的 FDAPIM-CDMA 码分多址方式;研究了其多用户干扰下的误码率特性;分析了同步与理想异步情况下的干扰密度函数;推导了 FDAPIM-CDMA 系统误码率上限和下限的表达式;并通过仿真与 OOK-CDMA 系统进行了比较。结果表明,码长越长、用户数越少,FDAPIM-CDMA 系统的误码率越低;对于过长的码重,系统可通过提高接收门限值来降低误码率;FDAPIM-CDMA 系统具有较强的抗对多用户干扰能力,当 $M \geq 6$, $T_1 = K$ 时,误码率上限值和下限值均低于 OOK-CDMA,且 M 值越大,减小量越大。因此 FDAPIM-CDMA 多址方式应用于无线光通信系统具有一定的优势。

参 考 文 献

- 1 J. M. Kahn, J. R. Barry. Wireless infrared communications [J]. *Proc. IEEE*, 1997, **85**(2): 265~298
- 2 Jia Kejun, Xue Jianbin, Peng Duo *et al.*. Modulation technologies under weak atmospheric turbulence channel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 569~573
贾科军, 薛建彬, 彭 铎等. 弱湍流信道中的调制技术 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 569~573
- 3 Yang Wenjun, Hu Yu. Performance of high-speed wireless infrared indoor communications [J]. *Wireless Optical Communications*, 2003, **27**(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, **27**(3): 42~45

- 4 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
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
- 5 Liu Guoliang, Rong Kunbi. Satellite Communications [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994. 95~100
刘国梁, 荣昆璧. 卫星通信 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994. 95~100
- 6 Pan Weiqing, Liu Liren, Lu Wei *et al.*. Hybrid OCDMA coding scheme of time-spatial frequency spreading spectrum based on optical imaging transmission [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 181~186
潘卫清, 刘立人, 鲁 伟等. 基于成像光通信的时间-空间扩频混合光码分多址编码方案 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 181~186
- 7 Tan Qinggui, Hu Yu. Atmospheric 2D-wireless optical code division multiple access communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 783~787
谭庆贵, 胡 渝. 二维大气无线光码分多址通信系统 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 783~787
- 8 Zhang Kai. Dual-amplitude pulse interval modulation for optical wireless communications and optical ETC prototype [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. 50~61
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, 2004. 50~61
- 9 F. R. K. Chung, J. A. Salehi. Optical orthogonal codes: design, analysis, and applications [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1989, **35**(3): 595~604
- 10 Li Xiaobin, Song Jianzhong. Discussion on an algorithm of construction of optimal (F, K, 1) optical orthogonal codes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 417~420
李晓滨, 宋建中. 最佳 (F, K, 1) 光正交码的构造算法研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 417~420
- 11 Ji Jianhua, Tian Jingjing, Mo Haoran *et al.*. A new family of two-dimensional optical orthogonal codes and its performance analysis [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(5): 667~670
吉建华, 田晶晶, 莫浩然等. 一种新的二维光正交码及其性能分析 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 667~670
- 12 T. Ohtsuki. Performance analysis of atmospheric optical PPM CDMA systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(2): 406~411
- 13 H. M. H. Shalaby. Performance comparison of number- and coherent-state optical CDMA in lossy direct-detection photon channels [J]. *IEEE ISSSTA '94*, 1994, **2**: 574~578
- 14 J. A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-Part I: fundamental principles [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(8): 824~833
- 15 J. A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-Part II: systems performance analysis [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(8): 834~842