

文章编号: 1001-3806(2010)06-0843-04

## 光通信中基于脉冲调制的联合编码调制研究

张铁英<sup>1</sup>, 王红星<sup>2\*</sup>, 何伍福<sup>3</sup>, 马杰<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院 战略导弹工程系, 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 烟台 264001; 3. 海军驻绵阳地区航空军事代表室, 绵阳 621000)

**摘要:** 为了研究无线光通信中数字脉冲调制与信道编码的联合编码调制问题, 在给出调制时域结构的基础上, 采用理论推导和数值仿真相结合的方法, 分析了基于二进制线性分组码的开关键控、数字脉冲位置调制和数字脉冲间隔调制系统的差错性能, 得出了信道编码纠错能力与调制阶数的结合关系。结果表明, 采用开关键控调制的系统, 其汉明距离与欧式距离等价, 故不存在调制与信道编码参量匹配问题; 脉冲位置调制系统在纠错个数大于调制阶数时, 可取得较明显的编码调制增益, 当纠错个数能被调制阶数整除时, 编码和调制达到匹配; 由于数字脉冲间隔调制的符号时隙不固定, 存在错误传播现象, 不宜与差错编码联合使用。所得结果可为无线光通信链路的设计提供参考。

**关键词:** 光通信; 编码调制; 增益; 误比特率

**中图分类号:** TN929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.033

### Error coded modulation based on digital pulse modulation in optical wireless communication

ZHANG Tie-ying<sup>1</sup>, WANG Hong-xing<sup>2</sup>, HE Wu-fu<sup>3</sup>, MA Jie<sup>2</sup>

(1. Department of Strategic Missile Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001; 2. Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 3. Aeronautical Military Representatives Office of Navy, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** For the sake of studying coded modulations between digital pulse modulation (DPM) and channel error coding in optical wireless communication, after introducing time domain structure of DPM, the error performances of on-off keying (OOK), pulse position modulation (PPM) and digital pulse interval modulation (DPIM) systems were analyzed with binary linear block code. Afterward computer simulations were conducted and the relationship between error correction ability of channel code and modulation level of DPM was obtained. Numerical results show that there is no matching issue for an OOK system using binary linear block code because its bijection between Hamming distance and Euclidean distance. For a PPM system, much better coding and modulation gain can be acquired if error correction number of binary linear block code is bigger than modulation level  $M$ . Especially, when error correction number is divided exactly by  $M$ , the coding gain and coding cost can get to balance. Moreover, channel code is not fit for DPIM since its variable symbol slots which cause error propagation. The conclusions can be used to help design of optical wireless link.

**Key words:** optical communication; coded modulation; gain; bit error rate

## 引言

无线光通信具有光纤通信和移动通信的优势及良好的应用前景, 近年来受到了广泛关注<sup>[1]</sup>。由于光频率调制和相位调制的复杂性, 所以, 目前商用化自由空间光通信系统广泛采用强度调制/直接检测 (intensity modulation modulation/direct detection, IM/DD) 系统。

近地无线光通信的信道为大气, 由于大气温度和压力的不均匀性导致激光在传输路径上折射率发生变化, 这使得接收信号强度起伏和相位抖动, 导致差错率急剧上升。因此要提高通信质量, 不仅要考虑调制方式和差错编码本身的选择, 还要考虑如何让二者结合, 发挥更好的效率。数字脉冲调制 (digital pulse modulation, DPM) 主要包括开关键控 (on-off keying, OOK)、脉冲位置调制 (pulse position modulation, PPM) 和数字脉冲间隔调制 (digital pulse interval modulation, DPIM)<sup>[2-4]</sup>等。参考文献[5]~参考文献[7]中详细分析了这几种经典调制方式的性能, 认为 DPIM 的带宽需求和功率效率相对平衡, 在应用中有一定优势, 但没

作者简介: 张铁英 (1974-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为大气信道中无线光通信的调制与编码。

\* 通讯联系人。E-mail: 13371368601@cumail.com

收稿日期: 2009-11-11; 收到修改稿日期: 2009-12-14

有考虑差错编码情况。参考文献[8]和参考文献[9]中分别分析了基于卷积码、并行级联码(Turbo)的OOK调制的差错性能;参考文献[10]和参考文献[11]中讨论了基于Turbo码、里德-所罗门码(Reed-Solomon,RS)码的PPM调制差错性能,但均未专门考虑如何将差错编码的参量与脉冲调制参量相结合从而取得好的调制编码增益。

针对于此,作者从数字脉冲调制出发,推导基于线性分组码的脉冲调制抗噪声性能,分析不同调制编码参量下的误码率变化规律,得出联合编码调制的参量配置,为设计光通信链路提供参考。

### 1 调制结构与信道编码

OOK,PPM和DPIM的调制结构在参考文献[2]中已有详细说明,此不赘述。为了便于下面研究分析,给出了信息比特、PPM和DPIM的调制结构对照表,其中DPIM没有考虑保护时隙,调制阶数 $M=2$ 。

Table 1 Mapping of bits to OOK, PPM, DPIM

info bits	OOK	PPM	DPIM
00	00	1000	1
01	01	0100	10
10	10	0010	100
11	11	0001	1000

由表1可知,若采用OOK为FSO系统的调制方式,则在一个信道码元周期内,已调信号间的欧式距离与编码序列间的汉明距离一一对应。因此,对于OOK,按照汉明距离最佳设计的纠错码,对应于已调信号的欧式距离也是最佳的,即汉明距离与欧式距离等价。

若采用PPM为无线光通信系统的调制方式,则无论编码序列间的汉明距离如何,已调信号的欧式距离均为一个常数,两者之间无法一一对应,汉明距离与欧式距离不等价。这将造成编码增益的损伤。为了便于比较,图1中给出了OOK和PPM的欧式距离随汉明

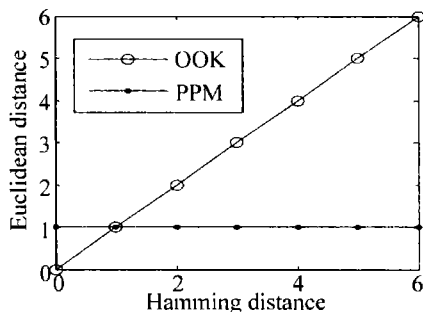


Fig.1 Euclidean distance's trend versus Hamming distance

距离的变化规律。

虽然脱胎于PPM,DPIM却是用脉冲间隔来传输信息的,不同的脉冲间隔代表不同的信息,将其作为调制方式的FSO系统的已调信号维数不固定,因此,无法用欧式距离来表征其抗干扰能力。

考虑一个(6,3)线性分组码,调制方式为DPIM的一个无线光通信系统。一个时隙发生误码将会影响到相邻的符号。如果“0”时隙被检测为“1”时隙,这相当于额外插入一个DPIM符号,下一个符号也将会解调错误,如图2a所示。正是由于额外DPIM符号的引

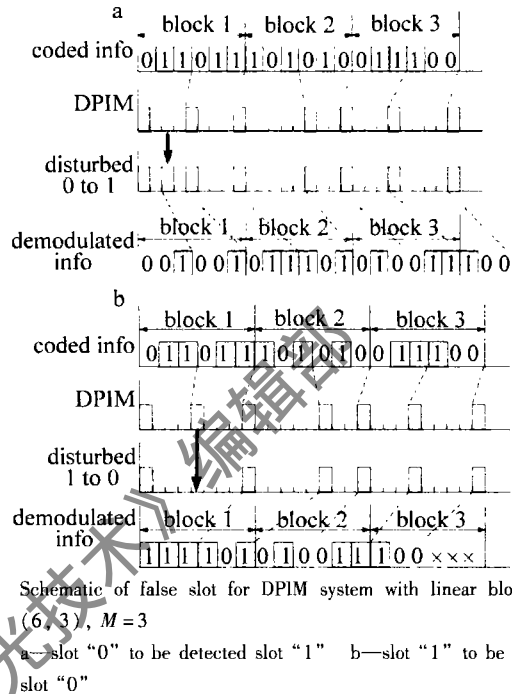


Fig.2 Schematic of false slot for DPIM system with linear block code (6,3), M=3

a—slot “0” to be detected slot “1” b—slot “1” to be detected slot “0”

入,使得解调后的分组码与调制前的分组码错位,即使后续的解调全部正确,也会出现向后的“错误传播”现象;相反,如果“1”时隙被检测为“0”时隙,那么错误时隙所在的符号就相当于被删除,后面一个符号也会相应地发生错误,如图2b所示。同样会造成解调后的分组码与调制前的分组码错位,出现向前的“错误传播”现象。由于存在“符号长度变化”和“错误传播”现象,使得解码过程无法顺利进行,故DPIM不宜与差错编码联合使用。线性分组码有完备的数学推导,因此本文中以线性分组码为例,主要研究OOK和PPM两种调制方式在线性分组码下的误码性能,并通过分析得出编码和调制的参量匹配。

### 2 纠错后差错概率性能

在第1节中定性讨论了OOK和PPM两种调制方式对差错控制编码的影响。在本节中要对此进行定量分析。

考虑一个码组长度为 $n$ ,信息码元数目为 $k$ 的二进制线性分组码 $(n, k)$ ,码组间最小汉明距离为 $d_{min}$ ,译码采用硬判决译码。若采用OOK调制方式,则解调时序列发生一位错误相当于编码信息码字的差错个数为1。因此,任何一个差错数为:

$$t = (d_{min} - 1)/2 \tag{1}$$

的码字都是可以纠正的。FSO 信道可以看作二进制无记忆对称信道,比特差错独立发生,在一个分组码内正好出现  $m$  个差错的概率为:

$$P(m, n) = C_n^m p^m (1 - p)^{n-m} \quad (2)$$

式中,  $p$  为译码前的误比特率。由于纠错后分组码的差错概率精确值难以求出,故码字误比特率由其上边界来表示:

$$P_{\text{OOK}} \leq \sum_{m=t+1}^n P(m, n) \quad (3)$$

当且仅当分组码是完备码时,上式等号成立<sup>[12]</sup>。

PPM 是一种分组调制方式,若解调发生错误则对应于编码信息的差错数会出现不同的情况,有可能错一位,也可能错  $M$  位。对于线性分组码,当码组长度  $n$  较大时,才能保证其为高效码;对于 PPM 调制,调制阶数  $M$  较大时会造成时隙同步的困难。因此,分组码和 PPM 调制结合一般考虑  $M \leq n$  的情况。

当  $M = n$  时,若 PPM 符号发生错误,则对应于编码信息差错个数为  $t$  位的概率为  $C_M^t / (2^M - 1)$ ,差错个数小于等于  $t$  的编码信息均能被纠正,所以经过纠错后 PPM 符号的差错概率上限为:

$$P_{\text{symbol}} \leq p_s \left[ 1 - \sum_{i=1}^t C_M^i / (2^M - 1) \right] \quad (4)$$

式中,  $p_s$  为译码前误符号率。上式等号成立的条件为分组码为完备码。

当  $M < n$  时,为了便于推导,只考虑  $n$  能被  $M$  整除的情况,并令  $Q = n/M$ ,即每个分组码对应于  $Q$  个 PPM 符号。若 PPM 符号发生错误,则经纠错后 PPM 符号的差错概率为:

$$P_{\text{symbol}} \leq \sum_{j=1}^Q C_Q^j p_s^j (1 - p_s)^{Q-j} \times \left[ 1 - \frac{\sum_{i_1=1}^t \sum_{i_2=1}^t \dots \sum_{i_j=1}^t C_M^{i_1} C_M^{i_2} \dots C_M^{i_j}}{(2^M - 1)^j} \right] \quad (5)$$

式中,  $i_1 + i_2 + \dots + i_j \leq t$ ,且  $M \geq t$ ,等号成立的条件是分组码为完备码。当  $M < t$  时,经纠错后 PPM 符号的差错概率为:

$$P_{\text{symbol}} \leq \sum_{j=1}^Q C_Q^j p_s^j (1 - p_s)^{Q-j} \times \left[ 1 - \frac{\sum_{i_1=1}^M \sum_{i_2=1}^M \dots \sum_{i_j=1}^M C_M^{i_1} C_M^{i_2} \dots C_M^{i_j}}{(2^M - 1)^j} \right] \quad (6)$$

式中,  $i_1 + i_2 + \dots + i_j \leq t$ ,等号成立的条件也是分组码为完备码。

在(4)式~(6)式中,推导结果是纠错后的误符号率,然而不正确的 PPM 符号仍可能产生一些正确的比

特。因此 PPM 系统的误比特率不同于误符号率。这一关系可通过求解不正确解调之后符号中具体比特发生错误的概率得到。若一个 PPM 符号发生错误,则  $M$  位信息中可能发生错误的位数为  $i$ ,  $1 \leq i \leq M$ ,相应的误比特率为:

$$\sum_{i=1}^M \frac{C_M^i}{(2^M - 1)} \cdot \frac{i}{M} = \frac{2^{M-1}}{2^M - 1} \quad (7)$$

所以,PPM 系统误比特率  $P_{\text{PPM}}$  与误符号率  $P_{\text{symbol}}$  通过下式相联系:

$$P_{\text{PPM}} = \frac{2^{M-1}}{2^M - 1} P_{\text{symbol}} \quad (8)$$

将(8)式带入(5)式和(6)式,可以得到 PPM 系统经纠错后的误比特率。

虽然文中的差错控制编码采用的是线性分组码,但推导结果也可经修改后应用至非线性编码,如卷积码、Turbo 码等其它二进制码。

### 3 仿真分析

在仿真中,信道模型以参考文献[6]中模型为基础略作修改,即在比特输入后增加信道编码器,时隙输出后增加解码器,其余保持不变。在 PPM 系统中,调制阶数  $M$  不同,其误比特率也不一样,因此规定  $M = 3$ 。信道差错编码采用线性分组码(3,1)码,(6,1)码,(12,2)码和(9,1)码。根据汉明限和普洛特金限可知<sup>[12]</sup>,这4组编码的纠错能力分别可达到1,2,3和4,满足  $t < M$ ,  $t = M$  和  $t > M$  的条件。之所以选择线性分组码的码长为3,6,9和12,是因为它们均能被  $M = 3$  整除。

仿真结果如图3和图4所示,这里假定 OOK 与

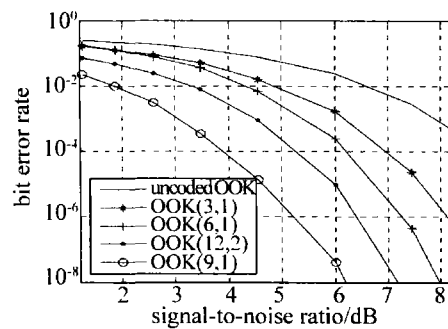


Fig. 3 Bit error rate based on error correction for OOK system

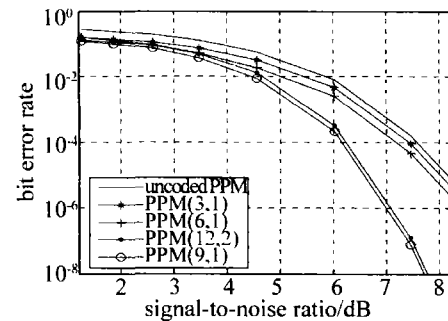


Fig. 4 Bit error rate based on error correction for PPM system

PPM 的峰值功率相等。图3为OOK纠错后误比特率,图4为PPM纠错后误比特率。由图3可知,对于OOK,当信噪比为6dB时,纠错个数每增加1,误比特率下降约1~2个数量级以上;当误比特率为 $10^{-6}$ 时,纠错个数每增加1,相对于未编码OOK可节省信噪比约0.9dB~1.2dB。这表明,对于OOK,即使是较简单的差错控制编码也具有较大的实际应用价值。从图4中可以看出,对于PPM,在不同的调制阶数下,随着纠错个数的增加,误比特率下降幅度不同。当 $t < M$ 时,在信噪比为6dB情况下,PPM(3,1)系统和PPM(6,1)系统误比特率比未编码PPM系统的误比特率仅分别降低约1倍和4倍;当误比特率为 $10^{-6}$ 时,PPM(3,1)系统和PPM(6,1)系统信噪比比未编码PPM信噪比仅分别节省0.2dB和0.4dB。当 $t \geq M$ 时,情况发生了改变,编码调制增益有了较大提升。当信噪比为6dB时,PPM(12,2)系统和PPM(9,1)系统的误比特率比未编码PPM下降将近2个数量级;当误比特率为 $10^{-6}$ 时,可节省信噪比分别约1.3dB和1.4dB。由此可以看出,当 $t = QM$ 时( $Q$ 为正整数),编码和调制达到匹配,取得了较好的编码调制增益。而当 $QM < t < (Q + 1)M$ 时,编码增益相对于 $t = QM$ 获得的编码增益增加不明显。这表明,对于PPM,要用较小的编码代价获得较好的差错编码增益,需要纠错个数能被调制阶数 $M$ 整除。

#### 4 结论

由纠错编码理论可知,通常用汉明距离来描述信道编码的抗干扰性能。但当信号经调制后,系统的误比特率取决于信号序列之间的欧式距离,编码的作用就是要增加欧式距离,从而改善系统的误码性能。DPIM编码调制系统存在“错误传播”现象,使得解码过程无法正确进行,故差错编码不宜与DPIM调制联合使用;对于OOK,已调信号间的欧式距离与编码序列间的汉明距离一一对应,所以其不存在编码调制参

量匹配问题;PPM调制是一种正交调制,当差错编码纠错个数能被调制阶数整除时,编码和调制实现了相互匹配,编码增益与编码代价达到了平衡。

#### 参考文献

- [1] PAN F, HAN Q Q, MA J. Measurement of scintillation and link margin for laser beam propagation on 3.5km urbanized path[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1): 1-3.
- [2] WANG H X, SUN X M, SUN X Y, *et al.* Performance of current digital pulse modulation schemes for optical wireless communications [C]//The Institution of Engineering and Technology International Conference. Hangzhou: Institution of Engineering and Technology Conference Publications, 2006: 656-659.
- [3] KIASALEH K. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(9): 1455-1461.
- [4] HAYES A R, GHASSEMLOOGY Z, SEED N L, *et al.* Base-line wander on the performance of digital pulse-interval modulation[J]. IEE Proceedings Optoelectronics, 2000, 147(4): 295-300.
- [5] HU Z M, TANG J X. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communications[J]. Journal on Communications, 2005, 26(3): 75-79(in Chinese).
- [6] WANG H X, ZHU Y B, ZHANG T Y, *et al.* Performance study of optical wireless DH-PIM and DPIM[J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 92-94(in Chinese).
- [7] PANG Zh Y, PIAO D Zh, ZOU Ch Y. Performance comparisons of several modulation schemes for optical wireless communication[J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 2002, 22(5): 1-4(in Chinese).
- [8] LI J, UYSAL M. Optical wireless communications: system model, capacity and coding[C]//Proceeding of IEEE Vehicular Technological Conference. Orlando, Florida: IEEE Press, 2003: 168-172.
- [9] CHEN J, HUANG D X, YUAN X H. Analysis of turbo coded optical wireless communication based on three different modulated modes[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4): 694-697(in Chinese).
- [10] ZHOU H Y, AO F L. The performance of turbo codes in optical PPM communication system[J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 2006, 22(3): 1-4(in Chinese).
- [11] LIANG Ch Y, ZOU Ch Y, AO F L. The implement method of RS codes in time domain in the submarine laser communication[J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 1998, 18(4): 15-19(in Chinese).
- [12] PPOAKIS J G. Digital communications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 333-335.