

文章编号: 0253-2239(2010)01-0026-05

多脉冲位置调制卫星光通信中时钟抖动对比特错误概率影响

李天松¹ 袁超伟¹ 易 淼² 周海燕²

(¹ 北京邮电大学 通信网络研究所, 北京 100876; ² 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要 多脉冲位置调制(MPPM)是基于脉冲位置调制(PPM)的改进形式,已成为卫星光通信中高效调制方式。针对存在背景辐射、大气湍流、热噪声的卫星光通信信道,研究了远场激光脉冲展宽机理和时钟抖动对系统的影响。提出基于格雷码的 MPPM 联合编码调制方式减小时钟抖动和码间干扰影响,应用星座图设计了基于格雷码(7,2) MPPM 映射方法,在相同传输带宽下(7,2)MPPM 的传输效率超过 16PPM 的 2 倍。分析泊松信道下基于格雷编码的(7,2)MPPM 字符错误概率和比特错误概率(BEP)。结果表明,采用格雷编码 MPPM 可以有效抵御定时误差并降低系统比特错误概率。

关键词 卫星光通信;多脉冲位置调制(MPPM);格雷码;时钟抖动;脉冲展宽

中图分类号 TN929.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0026

Time Jitter Effects on Bit Error Probability in Multi-Pulse Position Modulation Satellite Optical Communication

Li Tiansong¹ Yuan Chaowei¹ Yi Miao² Zhou Haiyan²

¹*Institute of Communication Networks Integrated Technique, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*
²*School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract Satellite optical communication system model and its channel MPPM (multi-pulse position modulation), an advanced form based on pulse position modulation, has become a high-performance optical communications satellite modulation. Far-field laser pulse broadening mechanism and effects of clock jitter on the system are studied with the existence of background radiation, atmospheric turbulence and thermal noise of satellite optical communication. Gray-coded MPPM is provided to decrease the clock jitter and inter-symbol interference influence and Gray-code mapping method is designed by constellation diagram. (7,2) MPPM transmission efficiency is more than two times that of 16PPM. Word error probability and bit error probability are analyzed with Gray coded (7,2) MPPM of Poisson-channel. Simulation results show that the use of Gray coded MPPM can effectively resist the timing error and reduce the system bit error probability.

Key words satellite optical communication; multi-pulse position modulation(MPPM); Gray code; time jitter; pulse broadening

1 引 言

卫星光通信中对调制有着特殊的要求,在选择调制方式时必须综合考虑它的功率利用率、频带利

用率以及信息传输速率、抗干扰能力等性能。首先卫星光通信中采用电池供电而且功率受限,这就要求所用调制方式功率利用率高;其次在卫星光通信

收稿日期: 2008-10-07; 收到修改稿日期: 2009-05-27

作者简介: 李天松(1975—),男,博士研究生,主要从事无线光通信和宽带通信网络等方面的研究。

E-mail: lts@guet.edu.cn

导师简介: 袁超伟(1961—),男,教授,主要从事未来移动通信及无线定位等方面的研究。

中频带利用率也是必须予以充分考虑的因素，如果带宽利用率太低，信息传输容量就会受到制约^[1,2]。无线光通信普遍采用强度调制/直接检测(IM/DD)方式，脉冲位置调制(PPM)是一种能获得较好平均功率效率的调制技术，可用较小的光平均功率达到很高的数据传输率。基于 PPM 的改进形式，多脉冲位置调制(MPPM)可以显著提高带宽效率、功率效率和信息传输吞吐量^[3]。

时隙同步是 PPM 光通信系统的关键技术之一。实际光通信系统存在时钟抖动，严重时引起时隙同步偏移。针对 MPPM 卫星光通信信道进行分析，提出了基于格雷码的 MPPM 联合编码调制方式消除时钟定时抖动影响，分析这种方式对系统误码率改善程度，给出其影响仿真结果。

2 星地激光信道

2.1 影响信道因素

大气湍流层是星地激光通信信道的一部分，当激光光束在湍流大气层中传输，大气湍流造成折射率的起伏导致光束波阵面的畸变，破坏了光束的相干性^[4]。引起接收面上光强起伏，从而给星地激光通信系统引进噪声。大气湍流对通信性能造成的影响是一个动态过程，它不仅与光束的传输参数、大气湍流状态有关，而且与激光链路的动态特性相关。当光束在湍流大气层的传输过程中，产生大气闪烁、光束漂移、光束扩展种种湍流效应。大气闪烁使得接收光强在时间和空间上随机起伏，光束扩展使得接收端的光斑半径或面积发生动态变化，悬浮粒子米氏散射造成光能量衰减。激光在大气中传输，大气的吸收使光脉冲能量随距离的增大而减小^[5,6]。

2.2 激光脉冲的展宽

强准直光束和低次散射光束达到接收机的时间短、强度大，使脉冲前沿快速上升。影响脉冲展宽的决定性参数是大气湍流强度，外尺度和发射脉冲的脉冲宽度。瞬时展宽随着湍流和外尺度的增大而增大，随着初始脉冲宽度的增大而减小，并且和光波波长无关，内尺度对瞬时脉冲展宽的影响不大。高斯脉冲散射引起的脉冲展宽和在不同时间段表现为漂移混合效应^[7]。在大气湍流和光电接收机信号处理共同作用下离光场中心越远，接收到的波形就越平坦。主要原因是远距离光场几乎没有准直光的成分，得到的波形表现为时延强烈衰落起伏的多重散射波形。不同路径光束强度的相互随机叠加、不同传输路径的随机时延和随机衰减以及光子本身的离

散性是产生这种衰落和脉冲展宽原因。

3 MPPM 帧结构

PPM 最早是由 Pierce J. R. 提出并应用于空间光通信，它是一种标称位置与信息信号的采样值成线性关系移动的正交调制方式。在激光通信中，可以在给定的激光脉冲重复频率下，用最小的光平均功率达到最高的数据传输率。MPPM 是基于 PPM 的改进形式，已成为卫星光通信中高效调制方式之一。PPM 在一帧分为 M 个时隙(激光脉冲持续时间)中传送一个光脉冲，而 MPPM 在一帧中传送 m 个光脉冲。(7,2)MPPM 与 16PPM 的调制方式如图 1 所示。PPM 中脉冲所在位置共有 M 种情况，每一帧传送的信息 $L_{\text{PPM}} = \lg M$ ，PPM 方式的传输效率为

$$R_{\text{PPM}} = \lg M / M. \quad (1)$$

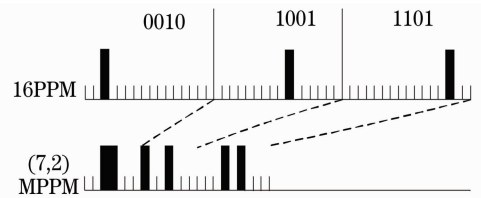


图 1 (7,2)MPPM 和 16PPM 的帧结构

Fig. 1 Frame structure of (7,2)MPPM and 16PPM

如果 MPPM 的一帧中的时隙数为 M 并且 m 个时隙有光脉冲，则就能得到 $Q = C_M^m$ 种不同脉冲组合形式，设这 Q 种组合都以相等的概率传送，则平均每帧传送的信息为 $L_{\text{MPPM}} = \lg Q$ ，MPPM 的传输效率 R_{MPPM} 为

$$R_{\text{MPPM}} = \lg 2^{L_{\text{MPPM}}} / M = L_{\text{MPPM}} / M. \quad (2)$$

所以能够选择 $2^{L_{\text{MPPM}}}$ 个字符来传输 Q 种组合的码字。经过计算容易得出 16PPM 每个时隙平均传输 0.25 bit，而(7,2)MPPM 传输 0.627 bit，在相同传输带宽条件下超过 16PPM 传输效率的 2 倍。从实际系统应用角度考虑，一般将若干比特分组，其码字集合总数为 2 的整数次幂，其数值小于 Q ，就会存在一定冗余码字，某种程度上降低了 MPPM 的传输效率。

4 定时偏移对 MPPM 影响

根据脉冲位置调制原理，光发射机将信息分组映射成 MPPM 帧，按照精确时钟来传输数据，光电接收机在接收到光子经光电转换，利用时钟恢复电路提取同步时钟信号，在依据同步时钟判断光脉冲相对位置，由解调器按照映射规则恢复出二进制信

息来恢复信号。基于光子计数的泊松信道^[8]噪声和脉冲展宽直接影响正确时隙的光子数数目和到达时间的精确判断,时钟漂移和定时抖动使得实际通信系统接收机难以做到完全同步,直接影响信息正确解调。因此分析 MPPM 时隙不同步时的系统性能十分必要。

在 MPPM 解码中,时隙不同步造成的定时误差降低了信号位置上的能量而使相邻位置的信号能量增加,对其他的位置没有影响(忽略端点位置可能受相邻帧的影响的边缘效应)。\$K_s\$ 和 \$K_b\$ 分别是一个时隙的到达光子数目和背景噪声光子数,对于 MPPM 可以对其在泊松信道传输出错时的概率进行推导,每个脉冲都可能出错在其他的时隙,也就是说会发生 \$Q-1\$ 种错误^[9]。

图 2 是 MPPM 出现定时偏移示意图,定义 \$\Delta T\$ 为时钟定时偏移时间,那么相对定时误差为 \$\epsilon = \Delta T/T_s\$。容易得出相邻两个脉冲中其中信号前一个脉冲的光子数减少为 \$\epsilon K_s\$, 信号脉冲则变为 \$(1-\epsilon)K_s\$。考虑 \$m=2\$ 双脉冲时,存在两种类型的双脉冲形式:一种是肩并肩连续脉冲,另一种则是一

帧两个脉冲是分离的。分析定时偏移引起的三种类型时隙 \$d1 \sim d3\$; 时隙 \$d1\$ 中的光子数 \$K_{d1} = K_s + K_b\$, 包括信号脉冲光子并且有背景光子; 时隙 \$d2\$ 中有 \$K_{d2} = K_s(1-\epsilon) + K_b\$, 在有信号脉冲并且有背景光子的时隙,光子数 \$K_{d2}\$ 为背景光子 \$K_b\$ 加上部分信号光子 \$K_s(1-\epsilon)\$; 在信号脉冲的相邻时隙 \$d3\$, 光子数 \$K_{d3}\$ 为背景光子 \$K_b\$ 加上部分信号光子 \$K_s\epsilon\$, \$K_{d3} = K_s\epsilon + K_b\$; 在其它的时隙 \$d4\$, \$K_{d4} = K_b\$。

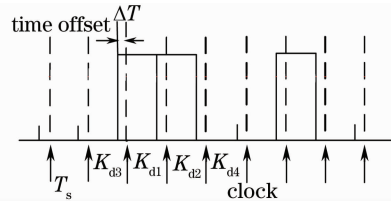


图 2 定时偏移示意图

Fig. 2 Timing offset diagram

如图 2 所示,假设发送脉冲位于 \$d1\$ 和 \$d2\$ 由于存在定时误差,得到不正确的两个脉冲的位置在 \$d3\$ 和 \$d1\$ 时隙可能性随着相对定时偏移的增加而增加,例如字符 0001100 极可能错误成字符 0011000。其概率为

$$P_s = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \left[\sum_{j=k}^{\infty} P(j, K_{d3}) \right] P(k, K_{d1}) + \left[\sum_{j=k}^{\infty} P(j, K_{d1}) \right] P(k, K_{d3}) \right\} \left[\sum_{j=0}^k P(j, K_{d1}) \right] \left[\sum_{j=0}^k P(j, K_{d2}) \right] \prod_{i \neq d1, d2}^{m-3} \left[\sum_{j=0}^k P(j, K_{d4}) \right], \quad (3)$$

其中 \$P(i, \lambda) = \frac{\lambda^i \exp(-\lambda)}{i!}\$, \$P(i, \lambda)\$ 表示泊松分布,其中 \$i\$ 表示收到的光子个数, \$\lambda\$ 表示平均到达光子个数。代入 \$K_{d1}, K_{d2}, K_{d3}, K_{d4}\$ 为

$$P_s = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \left[\sum_{j=k}^{\infty} P(j, K_s\epsilon + K_b) \right] P(k, K_s + K_b) + \left[\sum_{j=k}^{\infty} P(j, K_s + K_b) \right] P(k, K_s\epsilon + K_b) \right\} \left[\sum_{j=0}^k P(j, K_s + K_b) \right] \left[\sum_{j=0}^k P(j, K_s(1-\epsilon) + K_b) \right] \prod_{i \neq d1, d2}^{m-3} \left[\sum_{j=0}^k P(j, K_b) \right]. \quad (4)$$

此外两个脉冲出错位置还有可能发生在 \$(d2, d3), (d1, d4), (d2, d4), (d3, d3), (d3, d4)\$, 这些位置的字符错误概率推导公式参阅文献^[10]。如图所示,在定向时钟偏移下, \$K_{d3}\$ 信号光子数目随着 \$\Delta T\$ 的增加而增大, \$K_{d2}\$ 平均到达光子数目减少。\$K_{d1}, K_{d4}\$ 均保持不变。使得解调判决在 \$K_{d3}\$ 和 \$K_{d1}\$ 时隙的概率增加,由此可以得出时钟抖动偏移引起两个连续脉冲错误在相邻位置的误字概率增加。字符错误概率(WEP)表示解码得到不正确的 MPPM 脉冲位置的概率。这将导致一个不正确的分组比特字节解码。通过分析,不正确的解码字符仍有可能产

生一些正确的比特。MPPM 系统的比特错误概率(BEP)与 WEP 不成线性比例关系。利用这一特性设计一种编码映射方式可以降低比特错误概率。

5 (7,2)MPPM 格雷编码设计与分析

5.1 格雷码设计方法

格雷码是一种采用绝对编码的无权码,具有消除随机取数时出现重大误差的反射和循环特性,它的反射、自补特性使得求反非常方便。图 3 是 (7,2)MPPM 星座图,坐标数字表示脉冲所在位置。(7,2)MPPM 星座图上每个星座与周围相邻的星座

的汉明距离都等于 1,其余星座之间距离为 2。星座点(1,2)表示连续两个脉冲,考虑定时误差一般体现在一段时间的单向性漂移,根据以上分析,只考虑定时误差被误判为星座点(2,3)概率最大。字符错误概率 P_c 。越大的时候对应的汉明距离越小,从而降低比特错误概率 P_b 。比较显著的证据是假设某星座点(a,b)表示二进制 1000,误判成 0111 将错 4 bit;改为格雷编码后只错 1 bit。因此采用相邻字符位置的汉明距离最小编码方法是编码原则之一;据此在星座图上按照虚斜线方向依次映射到格雷码。

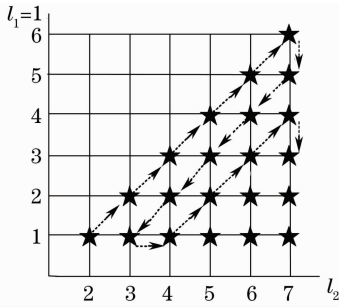


图 3 (7,2)MPPM 星座图

Fig. 3 (7,2)MPPM constellation diagram

使用(7,2)MPPM 来传输 4 bit 信号。其中的信号脉冲的位置设置为 (l_1, l_2) , l_1 和 l_2 为信号脉冲所在的时隙,则(7,2)MPPM 的映射表如表 1 所示。

表 1 (7,2)MPPM 格雷编码映射表

Table 1 Gray code mapping table

Code	(7,2)MPPM	(l_1, l_2)
0000	0000011	1, 2
0001	0000110	2, 3
0011	0001100	3, 4
0010	0011000	4, 5
0110	0110000	5, 6
0111	1100000	6, 7
0101	1010000	5, 7
0100	0101000	4, 6
1100	0010100	3, 5
1101	0001010	2, 4
1111	0000101	1, 3
1110	0001001	1, 4
1010	0010010	2, 5
1011	0100100	3, 6
1001	1001000	4, 7
1000	1000100	3, 7

5.2 仿真结果分析

图 4 是使用格雷编码和二进制编码时(7,2)MPPM在不同的时隙偏移下的比特错误概率对比示意图。从图中可以看出,在相对定时偏移较

小且在一定的信噪比(SNR)条件下,格雷编码和二进制码相比变化不大;随着相对定时偏移增大,使用格雷编码的 BEP 低于普通二进制编码的 BEP,其改善程度逐渐增大。综合考虑格雷码的相邻码元之间的码距平均要比普通二进制码小,在相邻码元之间的 WEP 由于定时偏移的影响却是最大。因此我们可以在编码的时候,使用格雷码的编码方式,这样可以有效的降低 BEP。

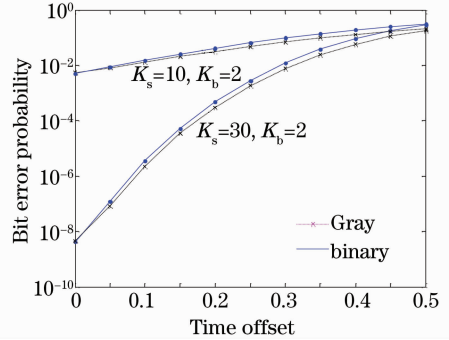


图 4 轻微偏移(7,2)MPPM 与 16PPM 比特错误概率
Fig. 4 (7,2)MPPM and 16PPM BEP with little jitter

图 5 为高信噪比和低信噪比条件下($\Delta T > 0.5$)比特错误概率仿真结果,对比可以看出,出现严重偏移时,格雷编码对系统性能的改善是非常明显的,而一般通信系统如果出现同样严重定时偏移时,系统

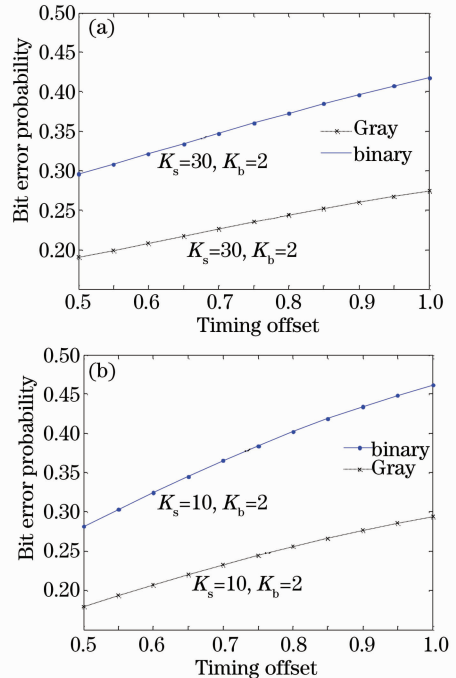


图 5 高信噪比(a)和低信噪比(b)条件下($\Delta T > 0.5$)比特错误概率

Fig. 5 BEP with high SNR (a) and low SNR (b) ($\Delta T > 0.5$)

基本上是陷于瘫痪;说明利用格雷编码一定程度上提高了系统可靠性。

6 结 论

分析了卫星光通信信道远场激光脉冲展宽机理和时钟抖动对系统的影响。提出基于格雷码的MPPM联合编码调制方式消除时钟抖动和码间干扰影响,利用星座图优化设计基于格雷编码的(7,2)MPPM映射方法,重点研究了存在严重定时偏移 $\Delta T > 0.5$ 的系统性能改善情况。为实际无线光通信调制解调系统设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 Guo Jianzhong, Tan Ying, Ai Yong. Study of modulation in satellite optical communication [J]. *Opt. Commun. Technol.*, 2006, **30**(04): 45~46
郭建中, 谭莹, 艾勇. 卫星光通信中的调制技术研究[J]. *通信技术*, 2006, **30**(04): 45~46
- 2 Jia Kejun, Xue Jianbin, Peng Duo *et al.*. Modulation technologies under weak atmospheric turbulence channel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 602~606
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): 602~606
- 3 H. Sugiyama, K. Nosu. MPPM: A method for Improving the band utilization efficiency in optical PPM [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(3): 465~472
- 4 Chen Huihui. Channel Coding Technology in Satellite Optical Communication System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. 11~19
陈卉卉. 卫星光通信信道编码技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. 11~19
- 5 Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1166~1172
梁波, 朱海, 陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1166~1172
- 6 He Xianqiang, Pan Delu, Bai Yan *et al.*. Exact computation of atmospheric diffuse transmittance for chinese ocean color and temperature scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 626~633
何贤强, 潘德炉, 白雁等. 海洋水色水温扫描仪精确大气漫射透射比计算[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 626~633
- 7 Tang Dongmei. Study on Temporal Propagation Characteristics of Ultrashort Spacetime Gaussian Pulses in a Laser Satellite Communication System [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 23~55
唐冬梅. 激光卫星通信中超短时空高斯脉冲瞬时传播特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 23~55
- 8 J. R. Pierce. Optical channels; practical limits with photon counting [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1978, **26**: 1819~1821
- 9 Kazumi Sato. Performance analysis of (m, 2) MPPM with imperfect slot synchronization [C]. IEEE Pac. Rim. Conference on Communications, Computers and Signal Processing Victoria, Canada, 1993, **2**: 765~768
- 10 Kazumi Sato. Performance of coded multi pulse PPM with imperfect slot synchronization in optical direct detection channel [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1994: 121~125