

文章编号: 1001-3806(2009)06-0597-03

时钟抖动对水下激光 MPPM 通信的误码影响分析

易 淼^{1,2}, 陈名松^{1*}, 李天松¹, 孙丽华¹

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 桂林 541004; 2. 宜春学院 理工学院, 宜春 336000)

摘要: 多脉冲位置调制(multi-pulse position modulation, MPPM)与脉冲位置调制相比具有能量信息效率高和带宽低的优点,是水下激光通信中一种有效的通信方式。为了研究时钟抖动对激光水下多脉冲位置调制通信的误码影响,在分析 MPPM 时钟抖动时的性能的基础上,通过理论计算提出了 MPPM 最小误比特率的映射列表的方法,分析并仿真了 MPPM 使用二进制码和格雷码两种编码方式的误比特率。结果表明,在相同的传输带宽和传输速率下,使用格雷码编码的 MPPM 误码性能优于二进制编码,且 MPPM 的性能优于脉冲位置调制,误比特率降低约 2.4dB。该研究结果对提高水下激光通信性能具有一定的理论参考价值。

关键词: 光通信;多脉冲位置调制;格雷码;时钟抖动;误比特率

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.011

Effect of imperfect slot synchronization on bit errors of MPPM in underwater laser communication

YI Miao^{1,2}, CHEN Ming-song¹, LI Tian-song¹, SUN Li-hua¹

(1. Information & Communication College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Institute of Technology, Yichun University, Yichun 336000, China)

Abstract: Multi-pulse position modulation(MPPM) is more effective than pulse position modulation(PPM) in underwater laser communication due to its advantages of high efficiency and low bandwidth. In order to study the effect of imperfect slot synchronization on bit error of MPPM in underwater laser communication, a method of MPPM map table with the smallest bit error rate was put forward after analyzing MPPM performance with imperfect slot synchronization performance is analyzed. Bit error rate of MPPM based on binary code was compared with that based on Gray code by means of simulation. The result showed that bit error rate of Gray code was lower than that of binary code at the same bandwidth and transmit rate with the bit error rate declined about 2.4dB. The obtained results are theoretic reference to the improvement of the performance of underwater laser communication.

Key words: optical communication; multi-pulse position modulation; Gray code; imperfect slot synchronization; bit error rate

引言

脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)是水下激光通信的一种调制方式,具有低能量传输的性能^[1],然而,PPM 调制对带宽的要求很高^[2]。为了解决这个问题,采用多脉冲位置调制(multi-pulse position modulation, MPPM),在相同的传输效率和信息帧长度的前提下, MPPM 的传输带宽将约为 PPM 的一半^[3]。

而光束在海水中的传输特性比较复杂,它存在着很多不确定的因素,海水的散射包括海水本身的瑞利散射和海水中悬浮粒子引起的米氏散射及透明物质折射所引起的散射。经过海水信道的多次散射后,接收到的信号波形发生了改变,时间明显扩展^[4-5],这样接收端对时钟同步的要求更为精确,如果时钟抖动,系统性能会随之改变。作者主要针对时钟抖动对激光水下 MPPM 通信的影响进行了分析。

1 MPPM 原理

MPPM 与 PPM 的调制方式见图 1。 T 为时隙时钟周期,PPM 在 1 帧中传送 1 个脉冲,而 MPPM 在 1 帧中传送 p 个脉冲,1 帧分为 m 个时隙。如果 MPPM 的 1 帧中的脉冲数为 p 并且 m 个时隙有脉冲,则就能得

基金项目:广西省自然科学基金资助项目(0832012);广西省研究生教育创新计划资助项目(2008105950810M414)

作者简介:易 淼(1979-),女,硕士研究生,主要研究方向为光通信中调制技术。

* 通讯联系人。E-mail: cms@guet.edu.cn

收稿日期:2008-08-08;收到修改稿日期:2008-09-23

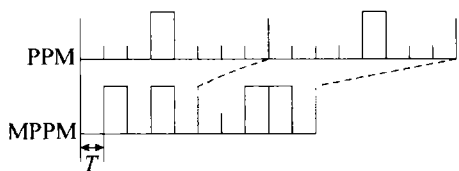


Fig. 1 Modulation of MPPM and PPM

到 $Q = C_m^p$ 种脉冲组合形式。设这 Q 种组合都以相等的概率传送, 则被传送的信息为 $L = \log_2 Q$ (bit/符号), L 为每个符号的比特数, 传输效率 $R = (\log_2 2^L) / m = L/m$ (bit/时隙)。所以能够选择 2^L 个字符来传输 Q 种组合的码字^[6-8]。

MPPM 以一定的时钟来传输数据, 接收端使用时隙同步时钟来恢复信号, MPPM 解调器在接收到光子后, 比较每个时隙的光子数, 找到有最大光子数所在的 p 个时隙, 解调出信号。但是, 如果接收机不能够同步, 那接收到正确时隙的光子数就有可能减少, 这样就不能够正确解调。因此, 需要分析 MPPM 时钟抖动时候的系统性能。

2 理论推导及计算

2.1 MPPM 的误字率

在 MPPM 解码中, 时钟抖动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, 对其它的位置没有影响, 如图 2 所示 (忽略了端点位

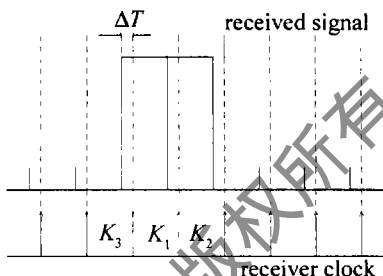


Fig. 2 Timing offset in MPPM timing

置可能受相邻帧的影响的边缘效应)^[9]。对于 $(m, 2)$ MPPM, 可以对其在泊松信道传输出错时候的概率进行推导, 每个脉冲都可能出错在其它的时隙, 也就是说会发生 $(Q - 1)$ 种错误。这几种出错的概率的表达式都可以推导出来, 下面推导出其中 2 种错误的概率表达式, 其中 ΔT 是定时误差的偏移时间, $\varepsilon = \Delta T/T$ 。

解码得到不正确的两个脉冲的位置在 K_3 和 K_1 时隙的概率如下式所示:

$$P_1 = P([(K_1, K_3) \geq (K_2, K_4)]) = \sum_{k=0}^{\infty} [\{ \sum_{j=k}^{\infty} P(j, K_3) \} \cdot P(k, K_1) + \{ \sum_{j=k}^{\infty} P(j, K_1) \} \cdot P(k, K_3)] \cdot \{ \sum_{j=0}^k P(j, K_2) \} \cdot \prod_{i \neq 1, 2}^{m-3} \{ \sum_{j=0}^k P(j, K_4) \} \quad (1)$$

$$P(i, \lambda) = \frac{\lambda^i \exp(-\lambda)}{i!} \quad (2)$$

式中, $P(i, \lambda)$ 表示泊松分布, i 表示收到的光子个数, λ 表示总共发送的光子个数。

解码得到不正确的两个脉冲的位置都在 K_4 时隙的概率如下式所示:

$$P_2 = P([(K_4, K_4) \geq (K_1, K_2, K_3)]) = \sum_{k=0}^{\infty} [2 \{ \sum_{j=k}^{\infty} P(j, K_4) \} \cdot P(k, K_4)] \cdot \{ \sum_{j=0}^k P(j, K_1) \} \cdot \{ \sum_{j=0}^k P(j, K_2) \} \cdot \{ \sum_{j=0}^k P(j, K_3) \} \cdot \prod_{i \neq 1, 2}^{m-5} \{ \sum_{j=0}^k P(j, K_4) \} \quad (3)$$

在有信号脉冲且有背景光子的时隙 K_1 , 此时隙的光子数为信号光子 k_s 加上背景光子 k_b ; 在有信号脉冲并且有背景光子的时隙 K_2 , 此时隙的光子数为背景光子 k_b 加上部分信号光子 $k_s(1 - \varepsilon)$; 在信号脉冲的相邻时隙 K_3 , 此时隙的光子数为背景光子 k_b 加上部分信号光子 $k_s \varepsilon$; 在其它的时隙 K_4 , 此时隙的光子数仅为背景光子 k_b ^[10]。

可以看出, (1) 式是两个连续脉冲错误在相邻位置的误字率, 例如字符 00011 错误成字符 00110 的概率。此外, 两个脉冲出错位置还有可能发生在 $(K_2, K_3), (K_1, K_4), (K_2, K_4), (K_3, K_5), (K_3, K_4)$ 以上这些位置的误字率都可以一一推导出来。在相同的传输带宽和背景噪声下比较上述所有误字率, 可以发现 (1) 式的误字率是最高的。

2.2 MPPM 的误比特率^[8]

强调误字率或者解码得到不正确的 MPPM 脉冲位置的概率, 这将导致一个不正确的比特字节解码。然而, 不正确的解码字符仍可能产生一些正确的比特。因此, MPPM 系统的误比特率 (bit error rate, BER) 不同于误字率。下面讨论误字率和误比特率的关系, 假定有 $X = S_1$ 个信号被发送, 接收到的信号为 S_m , 则解调后的码字为 $u_m = [u_{m1}, \dots, u_{mk}] = \text{enc}^{-1}(S_m)$ 。误比特率定义为^[11]:

$$P_b = \frac{1}{K} \cdot \frac{P_w}{2^K - 1} \cdot \sum_{m=1}^M d(u_1, u_m) \quad (4)$$

式中, $d(u_1, u_m)$ 为汉明距离, K 为码长, P_w 为误字率。通常情况下, P_w 可以表示为 (5) 式, 而应用在 MPPM 系统中 P_w 就是 (1) 式和 (3) 式的 P_1, P_2 。

$$P_w = 1 - P_w(\langle y, S_1 \rangle \geq \langle y, S_m \rangle \text{ for all } m \neq 1 | X = S_1) \quad (5)$$

MPPM 的映射方式有列表法和星座图法两种, 在此使用列表法。可以通过第 2.1 节中误字率的计算结果来设置取得最小误比特率的字符的位置, 即设置两个脉

冲所在的位置顺序。例如:使用(5,2)MPPM来传输3bit信号,其中的信号脉冲的位置设置为(i,j),i和j为信号脉冲所在的时隙,则(5,2)MPPM的映射表可设计成表1。

Table 1 Relation for binary source, Gray source, (5,2) MPPM and position of pulse

Gray code	binary code	(5,2) MPPM	(i,j)
000	000	00011	4,5
001	001	00110	3,4
011	010	01100	2,3
010	011	11000	1,2
110	100	00101	3,5
111	101	01010	2,4
101	110	10100	1,3
100	111	01001	2,5

可见,在这里尽量在每个字符中使用连续脉冲,例如字符00011,是因为连续脉冲的误字率要低于分开脉冲的误字率^[2]。而从(4)式可以看出,如果误字率 P_w 越大的时候对应的汉明距离越小,得到的误比特率 P_b 就会越小。表1中相邻字符之间使用连续脉冲依次相邻左移一位的排序,此时相邻位置的误字率符合(1)式的情况,即误字率 P_w 最大的情况。此时需要相邻字符位置的汉明距离最小编码方法,而格雷码在相邻位置的汉明距离是最小的,所以选用格雷码编码。

3 仿真与分析

图3是(5,2)MPPM使用格雷码和二进制编码时在时钟抖动下的误比特率仿真结果对比。格雷码的相

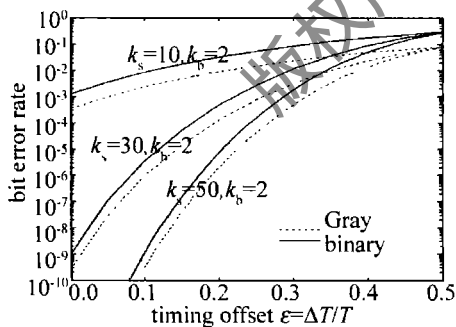


Fig. 3 Bit error rate of (5,2) MPPM with imperfect slot synchronization corresponding to different codes

邻码元之间的码距要比普通二进制小,而在相邻码元之间的误字率却是最大,所以使用格雷码的BER要低。仿真结果符合理论估算,从曲线可以看出,在相同的背景噪声 k_b 和相同的信号带宽的条件下,使用格雷码编码的MPPM性能优于普通二进制编码。故可以在编码的时候,使用格雷码的编码方式,从而优化系统的性能。

如果修改表1,而把MPPM的映射表随机设计成如下所示,这样就可以得到新的映射列表:(4,5),(1,3),(3,4),(2,4),(2,3),(3,5),(1,2),(2,5)。

同时使用格雷码编码时,把使用新的映射表得到的BER与表1的BER作对比分析,仿真结果如图4所示。从图4可以看出,新的映射列表的性能要差。因此,合理地设置映射列表对改善MPPM的差错性能很重要。

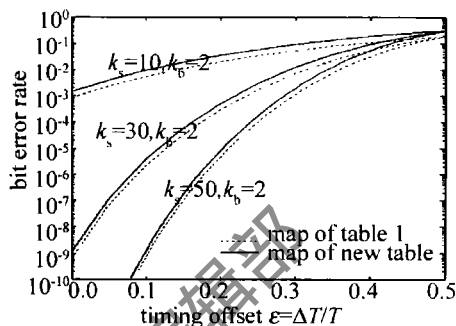


Fig. 4 Bit error rate of (5,2) MPPM with imperfect slot synchronization corresponding to different codes

MPPM和PPM都使用格雷码编码的BER的性能比较见图5。从图中可以看出,MPPM的性能优于PPM,原因之一是MPPM存在冗余,在这里则是因为采用了合理的映射列表使得MPPM的性能优于PPM。

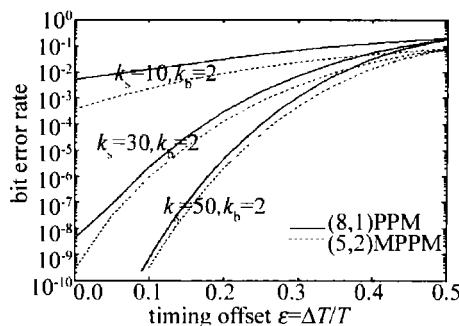


Fig. 5 Bit error rate of (5,2) MPPM and (8,1) PPM with imperfect slot synchronization based on Gray codes

4 结论

从理论分析出发,推导了(m,2)MPPM的在时钟抖动情况下的误比特率,分析了其对系统的影响,给出了仿真波形。计算并得出在采用格雷码编码时,具有最小误比特率MPPM的合适的映射列表。结果表明,要使系统能够准确地解调,时钟误差必须只占时隙时钟的一小部分,否则系统性能将严重恶化,而采用格雷码编码的MPPM的性能优于二进制编码,并且(m,2)MPPM的性能优于PPM。因此,在水下激光通信系统中,分析调制方式的本身的同时,还必须考虑时钟抖动的影响,选择格雷码的编码方式,以优化水下激光通信

(下转第603页)

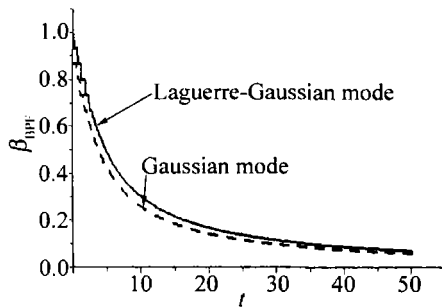


Fig. 5 The BPF of coherent beam combination versus filled factor

随着填充因子的增大,合成光束的光束质量逐渐变差,为了获得高光束质量的合成光束,在实验中应尽量保持较小的光纤间距。另外,从图5可以看出,用叠加近似模表征光纤激光时,其相干合成光束的 β_{BPF} 要大于用基模高斯光束表征的光纤激光的合成光束的 β_{BPF} ,说明光纤激光实际相干合成光束的光束质量要好于用高斯模计算的结果。

3 结论

通过将光纤激光弱波导近似模 LP_{01} 分解为无数个拉盖尔-高斯模的叠加,研究了光纤激光及其相干合成光场的传输行为,并与高斯近似模计算结果进行了比较。结果表明,虽然基模高斯光束能近似描述光纤弱波导近似模,但传输后,使用高斯近似模的计算结果会

与实际光场有较大误差。因此,为了更为精确地描述光纤激光及其相干合成光束的传输特性,应采用叠加近似模或其它更为精确的近似模式。

参考文献

- [1] GLOGE D. Weakly guiding fibers [J]. *Appl Opt*, 1971, 10(10): 2252-2258.
- [2] LIU G H, LIU D M. Theoretical study on spectral beam combining of fiber lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(5): 723-727 (in Chinese).
- [3] ZHANG Y, ZHANG B, ZHU S J. Analysis of property of the beam after spectral beam combining [J]. *Acta Physics Sinica*, 2007, 56(8): 4590-4595 (in Chinese).
- [4] LÜ B D, MA H. Coherent and incoherent combinations of off-axis Gaussian beams with rectangular symmetry [J]. *Opt Commun*, 1999, 171(4/6): 185-194.
- [5] LI Y Zh, QIAN L J. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. *Opt & Laser Technol*, 2007, 39(5): 957-963.
- [6] LOU Q H, ZHOU J, WANG Zh J. Analysis of high power fiber laser weapons [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3): 161-165 (in Chinese).
- [7] WU Ch Q. Optical waveguide theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 40-46 (in Chinese).
- [8] HILL C A, HALL D R. Coupling loss theory of single-mode waveguide resonators [J]. *Appl Opt*, 1985, 24(9): 1283-1290.
- [9] de ANGELIS G, PANARIELLO G, SCAGLIONE A. A variational method to approximate the field of weakly guiding optical fibers by Laguerre-Gaussian/Bessel expansion [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(12): 2665-2674.
- [10] SIMON M K, VILNROTTER V A. Performance analysis and tradeoffs for dual-pulse PPM on optical communication channels with direct detection [J]. *IEEE Transaction of Communication*, 2004, 52(11): 1969-1979.
- [11] 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).
- [12] ZHANG K, GONG M L, ZHANG H T, et al. Performance of dual head-pulse interval modulation for wireless infrared multipath channels [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(1): 4-7 (in Chinese).
- [13] GAGLIARDI R M, KARP S. Optical communications [M]. New York: Wiley, 1976: 286-287.
- [14] SATO K, DHITSUKI T, SASASE I. Performance of coded multi-pulse PPM with imperfect slot synchronization in optical direct-detection channel [C]//*Communication 1994*. New Orleans; IEEE, 1994: 121-125.

(上接第599页)

链路的性能。

参考文献

- [1] PIERCE J R. Optical channels: practical limits with photon counting [J]. *IEEE Transaction of Communication*, 1978, 26(12): 1819-1821.
- [2] SATO K. Performance analysis of $(m, 2)$ MPPM with imperfect slot synchronization [J]. *IEEE Communications, Computers and Signal Processing*, 1993, 2(19/21): 765-768.
- [3] SUGIYAMA H, NOSU K. MPPM: a method for improving the bandwidth efficiency in optical PPM [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1989, LT-7(3): 465-472.
- [4] HE X Sh, ZHU X, TAN X S. Research on the transmission delay of laser pulse caused by the sea water scattering effects [J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(1): 19-21 (in Chinese).
- [5] WANG M, LIU W H. Study on optical characteristics of seawater in blue-green laser uplink propagation model [J]. *Journal of East China Shipbuilding Institute (Natural Science Edition)*, 2005(1): 59-62 (in