

阈值可变的高速光通信脉冲位置调制的帧同步

涂焱阳^{1,2}, 吴志勇¹, 马爽¹, 李亚添^{1,2}, 李学良^{1,2}, 李林^{1,2}, 王也^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100039

摘要 设计并实现了一种并行循环移位比较的帧同步方式, 将其应用于传输速率为 $2.5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大气激光通信脉冲位置调制 (PPM) 系统中, 论述了该帧同步的工作原理, 并分析了其同步性能。采用特定帧头同步序列提高了系统对大气信道帧同步的容错能力, 在信道状态变差时通过适当减小检测阈值可保持较高的同步概率。理论及仿真结果表明, 该同步方案可在高速 PPM 光通信中实现帧同步, 对应于大气信道 3 种不同的情形, 检测阈值分别取 14、7~9、10~13 时可使系统保持较好的工作性能。

关键词 光通信; 脉冲位置调制; 帧同步; 阈值可变

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1106008

Frame Synchronization of Pulse Position Modulation in High-Speed Optical Communication with Variable Threshold

Tu Yanyang^{1,2}, Wu Zhiyong¹, Ma Shuang¹, Li Yatian^{1,2}, Li Xueliang^{1,2}, Li Lin^{1,2}, Wang Ye^{1,2}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A parallel cycle shift comparison method of frame synchronization is designed and implemented. The method is applied to atmospheric laser communication system with transmission rate of $2.5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ and pulse position modulation (PPM). The operation principle and the performance of the frame synchronization are studied. The fault-tolerant ability of frame synchronization in atmospheric channel is improved with the special frame head synchronous sequence. The system can maintain high synchronization probability when the channel condition becomes worse with decreasing of the detection threshold. Analysis and simulation results show that the frame synchronization scheme can realize the frame synchronization in the high-speed PPM optical communication, and the detection threshold values are 14, 7-9, 10-13 corresponding to three different atmosphere conditions to maintain good performance of the system.

Key words optical communications; pulse position modulation; frame synchronization; variable threshold

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 060.4080

1 引言

无线光通信技术无需频带许可, 具有高安全性、高传输速率、宽带宽等优点, 近年来备受关注^[1-3]。脉冲位置调制 (PPM) 技术具有较高的峰值光功率, 其优异的抗干扰能力及容错性能特别适用于实际的空间光通信, 并已得到广泛地研究^[4-8]。PPM 的关键在于实现时隙同步和符号同步, 以进行正确的解调, 符号同步建立在时隙同步的基础上, 时隙时钟可通过时钟数据恢复电路^[9-12]。传统的符号同步方法采用锁相环 (PLL)

收稿日期: 2017-06-08; **收到修改稿日期:** 2017-07-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (51605465)、中科院科研装备研制项目

作者简介: 涂焱阳 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: tuyanyang15@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 吴志勇 (1965—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电测控及光通信技术方面的研究。

E-mail: wuzy@ciomp.ac.cn

锁住肩并肩的两个光脉冲,对于高阶调制的 PPM,这种肩并肩信号的出现概率极低,同步建立时间较长^[13];张铁英等^[14-15]采用插入同步帧头的方式实现符号同步,但他们都是采用时隙时钟进行帧头的识别和数据的解码;对于现场可编程门阵列(FPGA),输入/输出(I/O)口数据的传输速率一般为几百兆,限制了 PPM 通信速率的上限,无法实现传输速率为 $2.5 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的通信,并且在大气信道的作用下,这两种帧头的容错性能不够理想。

在时钟恢复电路可恢复出时隙时钟的前提下,串并转换电路可将高速的串行信号转换为低速的并行信号。并行信号以符号时钟周期进入 FPGA 进行帧头检测和符号同步,可实现高速的 PPM 通信。本文理论分析了帧头检测阈值与大气信道状况及同步性能之间的关系,得到了检测阈值的取值范围,并对同步系统进行了仿真测试。

2 接收机同步单元电路

接收机同步单元电路原理图如图 1 所示,高速 $2.5 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 串行信号经基于 PLL 的时钟恢复电路后可恢复出时隙时钟。串行信号进入 1:16 解串器后可分为 16 路 $155 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的并行信号,解串器输出数据作为 16-PPM 符号进入 FPGA 并进行帧头检测和重新定位,从而完成 PPM 符号同步。采用解串器是为了将高速 $2.5 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 串行信号转换为 $155 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的并行信号,并利用 FPGA 对并行信号进行处理,从而实现高速 PPM 通信。

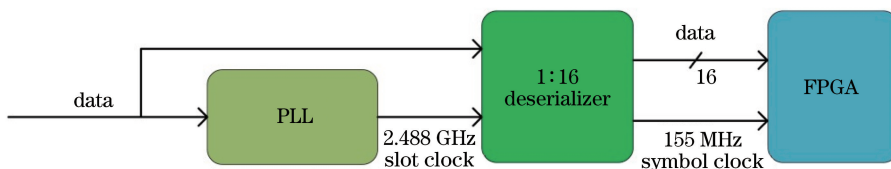


图 1 接收机同步单元电路原理图

Fig. 1 Principle of synchronization unit circuit of receiver

3 帧同步原理及实现过程

3.1 PPM 帧结构及同步帧头序列

PPM 帧结构包括帧同步头序列(FAS)和数据段(Payload),16-PPM 信息符号和帧结构如图 2 所示,帧同步头占整个帧的 0.8%,引入帧头对实际通信速率的影响较小。

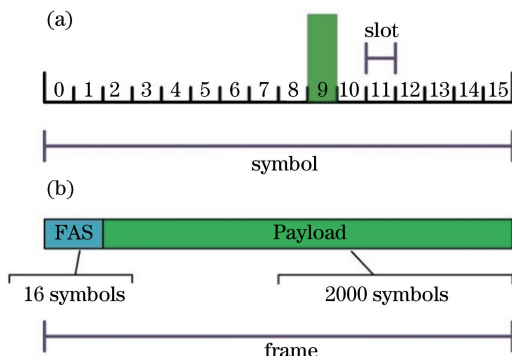


图 2 (a) 16-PPM 信息符号;(b)帧结构图

Fig. 2 (a) 16-PPM information symbol; (b) frame structure diagram

帧头序列应具有尖锐单峰特性的自相关函数, PPM 序列可被视为一个长度为 $n \times L$ 的特殊二元序列 $\{X_i\} (i=0, 1, \dots, nL-1)$; (n 为 PPM 时隙数; L 为 PPM 序列长度)。帧头序列的自相关函数 $R(k) = \sum_{i=0}^{nL-k-1} x_i x_{i+k}$, 对于所有非零 k 都满足 $R(k) \leq 1$ 的序列称为最优序列, FAS 示意图如图 3 所示, 该序列具有最



图 3 FAS 示意图

Fig. 3 Schematic of FAS

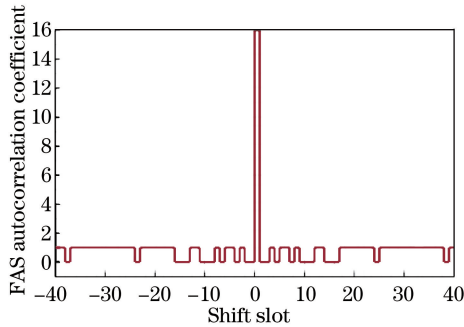


图 4 FAS 自相关特性

Fig. 4 Autocorrelation properties of FAS

优自相关特性^[16-17]。FAS 自相关特性如图 4 所示,具有单峰特性,保证了 FAS 只有在正确的时隙位置上才会被识别。

3.2 帧同步实现原理

通过插入帧头序列实现 PPM 帧同步,帧同步过程包含符号的同步,该过程中串行数据经串并转换芯片以 PPM 符号进入 FPGA,数据相对真实值发生偏移,即串并转换芯片采样时刻的抖动导致脉冲位置相对真实位置发生了前后移动,帧同步序列相对偏移示意图如图 5 所示。由图可见,FAS 可能整体出现时隙的超前或滞后,左右两侧不同颜色深度代表了序列相对真实位置的偏移程度。对于 16-PPM,脉冲位置超前 8 个时隙到滞后 8 个时隙正好包含所有情况。

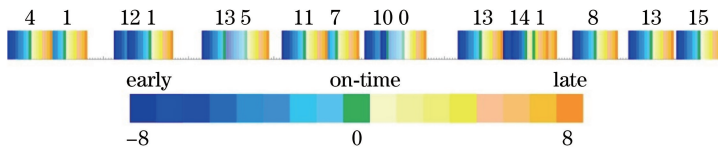


图 5 帧同步序列相对偏移示意图

Fig. 5 Diagram of frame synchronization sequence relative offset

设计了并行循环移位比较的帧同步方式,以实现帧头序列的准确定位和帧同步,从而实现 PPM 的符号同步和解码,帧同步原理图如图 6 所示。在符号时钟周期下,解串器输出的数据进入可存放帧头序列长度的移位寄存器中。移位寄存器中的数据逐步进行左移 8 位到右移 8 位的操作,并分成 17 路比较支路。17 路

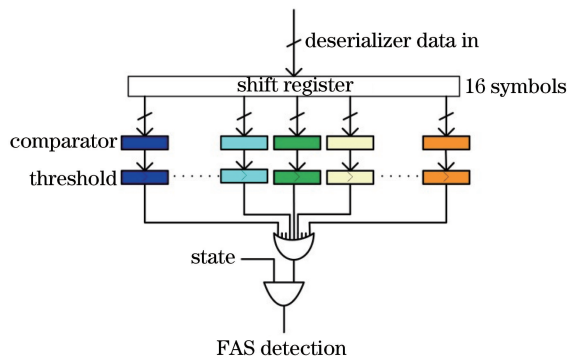


图 6 帧同步原理图

Fig. 6 Diagram of frame synchronization

信号进入比较器中与帧头序列模板相比较,可得到相同 PPM 符号的个数和超过帧头序列检测的阈值,最后输出帧信号。

3.3 帧同步状态机

帧头检测中,可能会出现数据段中检测到伪帧头序列的情况,以及大气信道干扰造成的帧头序列符号错误较多导致的帧头检测丢失。加入同步状态机可有效改善上述情况,帧检测加入同步状态信号,通过状态信号控制帧信号正确输出。采用常规 N/M 串行锁定技术实现帧同步^[18],连续检测到 3 个正确帧信号时系统进入同步状态,连续丢失 4 个帧头时系统回到初始检测状态,系统状态转移示意图如图 7 所示。

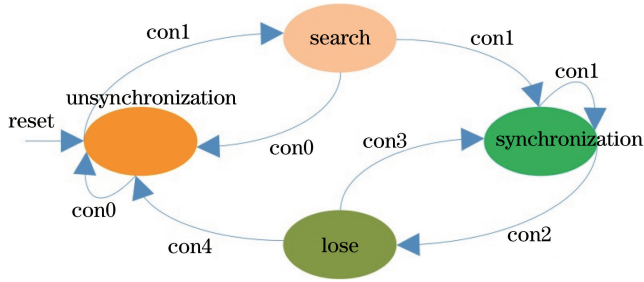


图 7 系统状态转移示意图

Fig. 7 Schematic of systematic state transfer

图 7 中各转移条件含义分别为:con0 表示非帧周期间隔检测到帧信号;con1 表示帧周期间隔检测到帧信号;con2 表示丢失帧信号;con3 表示重新找到帧信号;con4 表示连续丢失 4 个帧信号。系统状态分为 unsynchronization、search、synchronization、lose 4 种,其含义及相互转移过程为:unsynchronization 表示初始状态,在帧间隔周期检测到帧信号进入预同步状态 search,在其他间隔检测到帧信号继续保持初始状态;search 表示预同步状态,在帧间隔周期检测到帧信号进入同步状态 synchronization,在其他间隔检测到帧信号回到初始状态;synchronization 表示同步状态,在帧间隔周期检测到帧信号保持同步状态,在帧间隔周期若没有检测到帧信号,则系统状态进入帧头丢失状态 lose;lose 表示帧头丢失状态,在丢失第 4 个帧头前,若在正确间隔位置检测到帧信号则重新回到同步状态,否则进入初始状态,重新进行同步。

加入帧同步状态信号后,在同步状态和帧头丢失状态下,数据段检测到的伪帧信号不会被输出,因此系统在帧头丢失状态下仍能维持 PPM 正确解码,从而提高了系统的可靠性。

4 PPM 帧同步性能分析

4.1 帧同步概率及帧检测阈值设定

假定 PPM 误符号率(SER)为 P_{se} ,误码率(BER) P_{be} 与 P_{se} 之间的关系为 $P_{be} = \lceil n/2(n-1) \rceil \times P_{se}^{[19]}$,其中 n 为调制阶数(每个 PPM 信号的时隙数)。为方便计算,利用 P_{se} 进行计算,设 PPM 符号之间相互独立,帧头序列长度 $L = 16$,则帧头同步概率为

$$P_{synch} = \sum_{i=K}^L A (1 - P_{se})^i P_{se}^{L-i}, \quad (1)$$

式中 A 为 L 个符号中取 i 个符号的组合个数; K 为判定序列为帧头的检测阈值,其设置原理与伪帧头概率以及帧头同步概率有关,合适的 K 值可保证系统较高的同步概率。为降低伪帧头出现的概率,在数据段中考虑随机数形式,在不考虑符号错误的情况下,检测到伪帧头信号的概率为

$$P_{FA} = \sum_{i=K}^L A \left(\frac{1}{L}\right)^i \left(\frac{L-1}{L}\right)^{L-i}. \quad (2)$$

图 8 为 P_{FA} 与 K 的关系曲线,对于采用的含有 2000 个符号的数据段,数据段检测到帧信号的概率 $P_F \approx 2000P_{FA}$ 。 $K = 6$ 时, $P_F \approx 0.54$; $K = 7$ 时, $P_F \approx 0.05$ 。因此, $K \geq 7$ 时可保证较低的 P_{FA} 。

图 9 为 $K \geq 7$ 时帧头同步概率与 SER 之间的关系,以同步概率达到 90% 为系统同步性能指标,在大气信道状态恶化的情况下,可通过适当降低帧检测阈值来维持系统的同步性能;对于过大的帧检测阈值,达到

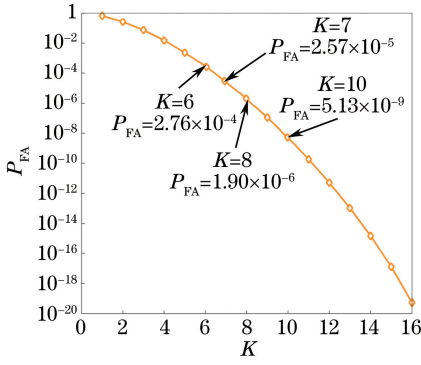


图 8 P_{FA} 与 K 的关系曲线

Fig. 8 Relationship between P_{FA} and K

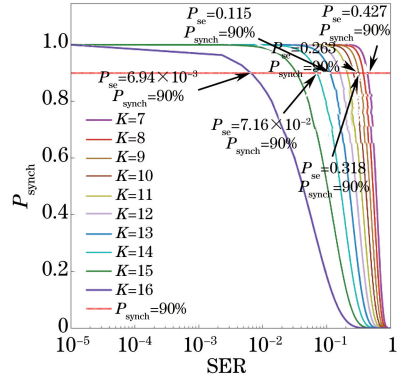


图 9 不同 K 下 P_{synch} 与 P_{se} 关系

Fig. 9 Relationship between P_{synch} and P_{se} with different K

同步概率 90% 所要求的 SER 极小。

激光信号在湍流大气中传输时的平均误码率 ($\langle P_{se} \rangle$) 可定义为^[20]

$$\langle P_{se} \rangle = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} P_1(u) \operatorname{erfc} \left(\frac{\langle R_{SNR} \rangle u}{2\sqrt{2}} \right) du, \quad (3)$$

式中 $P_1(u)$ 为强度起伏的概率密度函数; $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为补余误差函数; u 为归一化信号光强; $\langle R_{SNR} \rangle$ 为平均信噪比。考虑弱起伏情况, $P_1(u)$ 采用对数正态分布模型, 其概率密度函数为

$$P_1(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2} u} \exp \left[-\frac{\left(\ln u + \frac{1}{2}\sigma_1^2 \right)^2}{2\sigma_1^2} \right], \quad (4)$$

式中 σ_1^2 为闪烁指数。对于平面波, 弱起伏下闪烁指数可表达为

$$\sigma_1^2 = \sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (5)$$

式中 σ_R^2 为平面波 Rytov 方差, k 为波数, L 为通信距离, C_n^2 为大气湍流结构常数。对于数字激光通信系统, 光接收机接收光信号时的 BER 为

$$P_{se} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{4}{\sqrt{2}\sigma_1^2} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{4}{\sqrt{2} \times 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}} \right) \right]. \quad (6)$$

在通信波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 下得到不同大气湍流结构常数下 BER 与通信距离的变化关系如图 10 所示。从图中可以看出: 随着大气湍流变强, BER 增大; 随着通信距离的增加, BER 增大。

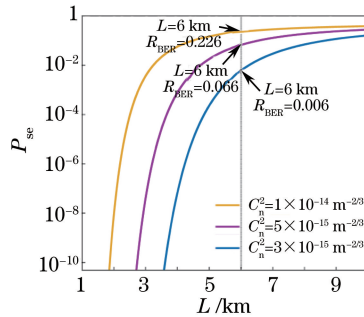


图 10 不同大气湍流结构常数下 BER 与通信距离的变化关系

Fig. 10 BER versus communication distance under different atmospheric turbulence structure constants

以通信距离 $L = 6 \text{ km}$ 为例, 在 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14}, 5 \times 10^{-15}, 3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 的情况下, BER 分别为 0.226, 0.066, 0.006; 由 BER 与 SER 的关系可知, 对应的 SER 分别为 0.424, 0.124, 0.011。由图 9 可以看出, 在同步概率指标为 90% 的情况下 SER 与检测阈值的关系, 阈值选取关系如表 1 所示。考虑到不同大气湍流结构常数附近的取值情形, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14}, 5 \times 10^{-15}, 3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 对应选取帧检测阈值为 14, 7~9, 10~13。当大气湍流强度变化时, 可通过调整阈值至对应区间来达到较好的同步性能。帧检测阈值上限设置为 14, 这是由于检

表 1 大气信道状况与 SER、FAS 检测阈值的关系

Table 1 Relationship among atmospheric channel condition, SER and FAS detection threshold

$C_n^2 / \text{m}^{-2/3}$	3×10^{-15}	5×10^{-15}	1×10^{-14}
SER	< 0.05	0.05-0.3	0.3-0.427
FAS detection threshold	14	10-13	7-9

测阈值为 15、16 时所要求的 SER 极低,设置过高的检测阈值反而使帧检测漏警概率增大、同步性能下降。

4.2 系统平均同步建立时间

考虑信道状态较好的情形,即 $P_{se} < 0.1$,帧检测阈值 K 取 10,帧头同步概率 $P_{synch} > 0.99$,则连续 3 帧头实现同步的概率大于 97%。图 11 为帧同步建立分析示意图,考虑到数据段出现伪帧头的概率很小 ($P_F \approx 10^{-5}$),这里只考虑伪帧头出现一次的情况,若在 data 1 出现,则需连续检测到 3 个帧头;若在 data 2 出现,则需连续检测到 4 个帧头;若在 data 3 出现,由于前 3 个帧头检测已完成同步状态,data 3 内的帧信号将不会影响同步过程。

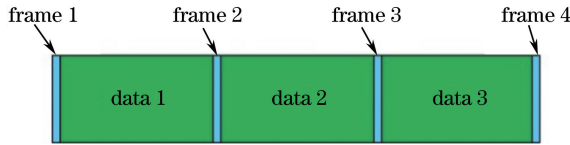


图 11 帧同步建立分析示意图

Fig. 11 Schematic of process of frame synchronization

平均同步建立时间 $T \approx 2T_{Frame} + P_F \times (3+4)T_{Frame} \approx 2T_{Frame}$ (T_{Frame} 为 1 个数据时间),即平均同步时间约为 2 帧数据时间。对于 $2.5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ PPM 通信, $T \approx 25 \mu\text{s}$ 。

对于信道状态较差的情形,在同步过程建立中,在数据段检测到伪帧头的概率增大,并且帧头同步概率减小,导致可能需要检测更多的帧数据才能确保正确进入同步,因而平均同步建立时间会变长。

5 同步系统仿真

在 FPGA 中进行建模仿真,同步仿真原理图如图 12 所示。为方便进行仿真测试,信号源代替解串器产生并行信号,在并行时钟下存入移位寄存器中,利用比较模块实现 17 路移位操作以及与帧头序列模板比较,以输出 17 路的帧信号。利用选择模块对帧信号进行选择,输出正确的帧信号并确定相对偏移量定位数据输出窗口,结合同步状态机模块产生的状态信号,最终输出正确的帧信号和数据。

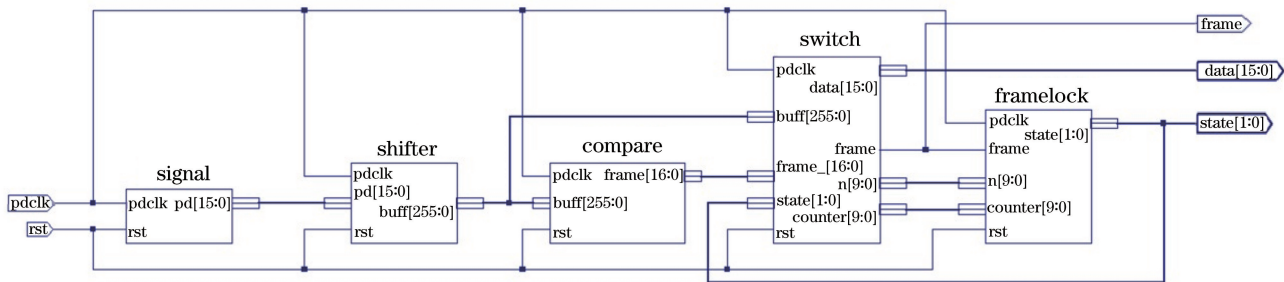


图 12 同步仿真示意图

Fig. 12 Schematic of synchronization simulation

图 13 为系统同步仿真过程图,frame[16:0]信号为 17 路帧信号检测支路,frame 信号为帧检测最终输出信号,dataframe 信号为数据有效信号,n[9:0]信号表示帧信号间隔,测试时数据段包含 100 个数,在 frame[0]路数据段出现了帧信号,由于状态机处于同步状态(state="10"),最终输出的 frame 信号中此伪帧头将不会被输出,仿真中还对连续丢失 4 个帧头的情况进行了测试,由 frame 信号可以看到,丢失第 1 个帧头时,同步状态机进入丢失帧头状态(11),而 dataframe 直到丢失第 4 个帧头时才进入无效状态,帧同步状态进入起始状态(00),在帧周期间隔内连续检测到 3 个帧信号,系统再进入同步状态,仿真时序与设计相符。

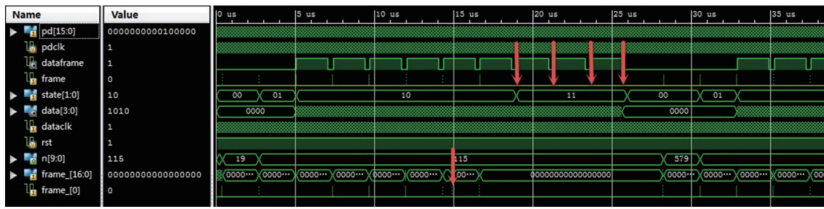


图 13 系统同步仿真过程图

Fig. 13 Diagram of simulation process of system synchronization

6 结 论

PPM 方式是无无线激光通信的关键技术之一,实现 PPM 解调的关键是实现符号的同步,而符号同步可由帧同步实现。采用并行循环移位比较的帧同步序列方式实现 PPM 帧同步,给出了实现 PPM 帧同步的原理框图,并分析了系统的同步性能,给出了系统帧检测阈值的设置方案。该同步方案在高速率 PPM 通信下可实现帧同步,在大气信道状态恶化的情况下,通过对帧头同步检测阈值进行调整,系统仍可保持较好的同步性能,且系统实用、可靠,非常适用于高速大气激光 PPM 通信系统。

参 考 文 献

- [1] Majumdar A K, Ricklin J C. Free-space laser communications: Principles and advances[M]. New York: Springer, 2008.
- [2] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications[M]. Switzerland: Springer, 2016: 279-280.
- [3] Khalighi M A, Uysal M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 2231-2258.
- [4] Liu Min. Research on the transmission performance of LDPC and PPM in wireless laser communication system[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
刘敏. 无线激光通信系统中 LDPC 码和 PPM 的传输性能研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [5] Wang Haixian. Technology of laser communication in atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(2): 123-127.
王海先. 大气中激光通信技术[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(2): 123-127.
- [6] Wang Yan, Li Hongzuo, Zhang Meng, et al. Research of pulse position modulation modulation characteristics of fiber laser in space optical communications[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805001.
王岩, 李洪祚, 张猛, 等. 空间光通信光纤激光器脉冲位置调制特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805001.
- [7] Wang Chen, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, et al. Error performance analysis of photon-counting based receiving for optical wireless communication[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0305002.
汪琛, 徐智勇, 汪井源, 等. 无线光通信中基于光子计数的接收误码性能分析[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0305002.
- [8] Wang Yan, Zhang Huaxun, Zhang Meng, et al. New pulse-position modulation technology in deep-space optical communications[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0505008.
王岩, 张化勋, 张猛, 等. 深空通信中新型脉冲位置调制技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505008.
- [9] Guo Gan. Clock recovery technology in high speed serial communication[D]. Shanghai: Fudan University, 2005.
郭淦. 高速串行通信中的时钟恢复技术[D]. 上海: 复旦大学, 2005.
- [10] Wang Tao. Research on high speed and low noise phase locked clock recovery circuit[D]. Shanghai: Fudan University, 2004.
王涛. 高速低噪声锁相时钟恢复电路研究[D]. 上海: 复旦大学, 2004.
- [11] Huang Chong. Design and implementation of a high performance clock and data recovery circuit[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
黄冲. 高性能时钟数据恢复电路的设计与实现[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- [12] Li Dachao. The design and implementation of a clock and data recovery circuit based on phase locked loop[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.

李大超. 一种基于锁相环的时钟数据恢复电路的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

- [13] Snyder D, Rhodes I. Phase and frequency tracking accuracy in direct-detection optical-communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 1972, 20(6): 1139-1142.
- [14] Zhang Tieying, Wang Hongxing, Xie Chuanjun. Symbol synchronization for pulse position modulation in optical wireless communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(5): 60-64.
张铁英, 王红星, 解传军. 一种无线光通信中脉冲位置调制的符号同步方法[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(5): 60-64.
- [15] Wang Hongxing, Sun Xiaoming, Zhou Min. Symbol synchronization of pulse position modulation for optical wireless communications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(3): 347-349.
王红星, 孙晓明, 周旻. 无线光通信脉冲位置调制的符号同步技术[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(3): 347-349.
- [16] Gagliardi R, Robbins J, Taylor H. Acquisition sequences in ppm communications (Corresp.) [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1987, 33(5): 738-744.
- [17] Willis M M, Robinson B S, Stevens M L, *et al.* Downlink synchronization for the lunar laser communications demonstration[C]. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2011: 83-87.
- [18] LAN/MAN standard committee. IEEE Std 802.3apTM-2007 [S]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2007: 156-157.
- [19] Phillips A J, Cryan R A, Senior J M. An optically preamplified PPM intersatellite system described by a moment-generating function formulation[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1995, 8(4): 200-204.
- [20] Zhu Yaolin, Song Miao. Numerical simulation of the impact of atmospheric turbulence on the laser signal[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(11): 1268-1272.
朱耀麟, 宋苗. 大气湍流对激光信号影响的数值模拟[J]. 激光与红外, 2013, 43(11): 1268-1272.