

# 基于可编程逻辑门器件的高速脉冲位置调制通信系统设计

林明杰<sup>1,2</sup> 杨燕<sup>1,2</sup> 朱韧<sup>1,2</sup> 侯霞<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 设计了一种用于地面至卫星上行通信链路的高速光通信系统, 系统采用可编程逻辑门器件(FPGA)作为主控单元, 脉冲位置调制(PPM)作为基本调制方式, 针对 PPM 通信中的帧同步问题, 设计了特别的帧头帧尾结构保证信息同步。另外接收端对 PPM 信号同步解调时的时隙同步采用了四个相位时钟同步提取的方法, 有效地降低了 FPGA 的工作频率, 简化了系统设计。PPM 编码采用格雷码映射, 有效地降低了误比特率。系统最终实现了 20 Mbit/s 的通信速率, 实际测试误码率(BER)为  $8.9 \times 10^{-9}$ 。该系统为后续星地间图像数据信息传输提供了实验支持。

**关键词** 光通信; 激光通信; 可编程逻辑门器件; 脉冲位置调制; 时钟同步

**中图分类号** TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0905002

## Field-Programmable-Gates-Array Based Pulse Position Modulation Communication System Design

Lin Mingjie<sup>1,2</sup> Yang Yan<sup>1,2</sup> Zhu Ren<sup>1,2</sup> Hou Xia<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A high speed optical communication system based on field-programmable-gates-array (FPGA) is designed, which can be used in ground to satellite communication. FPGA is used as central process, and pulse position modulation (PPM) is selected. A new frame structure is designed to solve frame synchronizing problem, and four separating phase clocks are used to synchronize PPM slots. FPGA's working clock is decreased and structure of the system is simplified in the new design, and Gray code is used to decrease bit error. The data rates can reach up to 20 Mbit/s, and bit-error-ratio (BER) is  $8.9 \times 10^{-9}$ . The system provides experimental supports for follow-up image data transforming between ground and satellite.

**Key words** optics communications; laser communication; field programmable gate array; pulse position modulation; clock synchronization

**OCIS codes** 060.4510; 220.4830; 010.3310

## 1 引言

激光通信因其信道容量大、传输速度快、单向性保密性好而在空间通信中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>, 脉冲位置调制(PPM)作为激光通信中常用的调制手段, 近年来对于 PPM 及 PPM 方式衍生的一些调制方式的研究得到了充分的发展<sup>[3]</sup>。PPM 的基本原理

是通过控制激光脉冲在通信时隙中出现的位置来传递信息, 具有系统易于实现, 光功率利用效率较高等众多优点<sup>[4]</sup>。2013 年美国国家航空和宇宙航行局(NASA)的月球激光通信项目(LLCD)中地面至卫星的上行通信就采用 PPM 调制方式<sup>[5]</sup>, 最高通信速率达到 20 Mbit/s<sup>[1]</sup>, 而在卫星至地面的下行通信

**收稿日期**: 2014-02-24; **收到修改稿日期**: 2014-04-04

**作者简介**: 林明杰(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事高速数据采集方面的研究。E-mail: linmingjie@foxmail.com

**导师简介**: 侯霞(1975—), 女, 研究员, 硕士生导师, 主要从事星载激光遥感及激光雷达等方面的研究。

E-mail: hou\_xia@siom.ac.cn(通信联系人)

中,结合自适应光学与其他调制方式相结合的方式,PPM 通信速率可以进一步提高<sup>[1,6-7]</sup>。

PPM 系统主要由 PPM 调制电路、可调制激光源、光电探测以及 PPM 信号解码四个模块组成,其中对 PPM 信号的调制解调均采用了现场可编程逻辑器件(FPGA),可以实现对 PPM 数据的实时调制与解调。针对 PPM 信号脉冲间隔较大,不利于恢复时钟的问题。本文设计了特殊的帧头帧尾结构,通过对本地时钟分别进行  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  相移处理,四个相位同时对 PPM 信号进行采样和解码,从而实现对 PPM 信号的同步接收,可以有效地检测帧头帧尾结构,从而实现帧的同步。在时钟精度为  $5 \times 10^{-5}$  的情况下,系统可以实现单帧传输 8 kbit 数据,并且帧与帧之间不需要静默时间,可以有效地利用通信带宽,实际测试通信速率可以达到 20 Mbit/s。

## 2 通信系统简介

为实现通信距离为 1200 km 以上地面到卫星的上行链路通信,设计了一套依托地面天文望远镜的发

射系统和卫星端的接收系统,在晴空、薄卷云的情况下实现通信速率达到 20 Mbit/s,整个系统主要由调制模块、接收模块和解码模块三大部分组成。系统设计采用通信光波长为  $1 \mu\text{m}$ ,地面模拟框图见图 1。FPGA 读取信源后,在 FPGA 内部通过同步时序逻辑电路对信源进行 PPM 调制,调制电信号经放大后驱动电光调制器对激光输出的光信号进行调制,输出光脉冲;光脉冲经过衰减到达接收机,接收机经光电转换后输出电信号,电信号经过动态增益调节和波形调理后送入接收端 FPGA 进行解调,接收端 FPGA 内部测试模块还可以将解码信号与解调后的信号进行比对,得到系统误码率(BER)信息。

由于本设计中 PPM 通信速率达到 20 Mbit/s,相应的调制时钟和采样时钟均达到 100 MHz。对于这样的高速信号,数字信号处理机(DSP)已经很难采集处理,因此在系统中对于 PPM 信号的调制解调均采用了 FPGA,可以实现对于 PPM 数据的实时调制与解调。

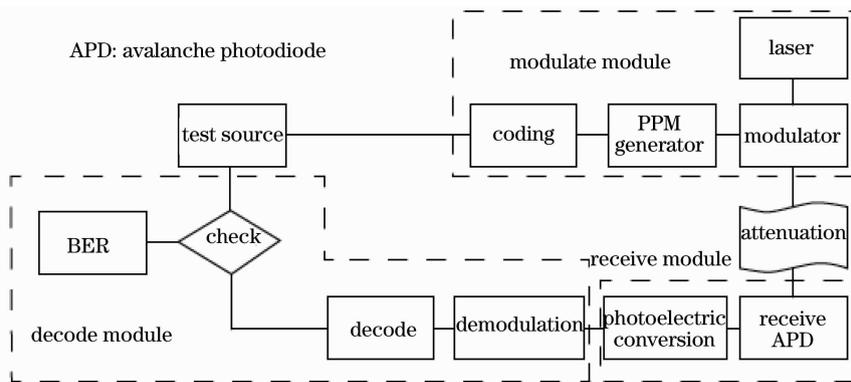


图 1 系统框图

Fig. 1 System diagram

星地通信首先需要考虑到大气的通信信道,其中最主要的是 20 km 的对流层。在对流层传输过程中,所受到的大气影响最大。对于脉冲宽度为纳秒量级的激光脉冲,主要考虑多径时间延迟造成的接收脉冲的展宽问题<sup>[8]</sup>。为了克服脉冲展宽带来的影响,在帧结构中引入保护时隙的方式。

## 3 技术方案

### 3.1 PPM 调制模块

PPM 的信号预调制采用 FPGA 实现,PPM 采用含有四个保护时隙的 16-PPM 实现,帧头采用 5 个连续的、间隔为 380 ns 的脉冲,帧尾采用 5 个连续的、间隔为 370 ns 的脉冲如图 2 所示。不同于一

般 PPM 的窄时隙结构<sup>[6]</sup>,本设计中采用的时隙宽度为 10 ns,采用宽脉冲的好处是 PPM 调制信号可以直接由 FPGA 产生,并且在接收端 PPM 信号可以直接送入 FPGA 中进行解码,可以有效地简化系统设计。

PPM 调制的映射不采用一般设计中的直接映射,而是采用格雷码映射。考虑到 PPM 信号的特殊性,一般 PPM 出现误码的情况是脉冲偏离一个时隙,造成符号译码错位 1 bit。对应于 16-PPM,反映到二进制数据上可能出现多比特数据错误,而格雷码的特点是相邻的码元之间只有 1 bit 数据不同,因此对于一位符号位的错位反映到二进制上也只有 1 bit 错误,可以有效地降低误比特率。

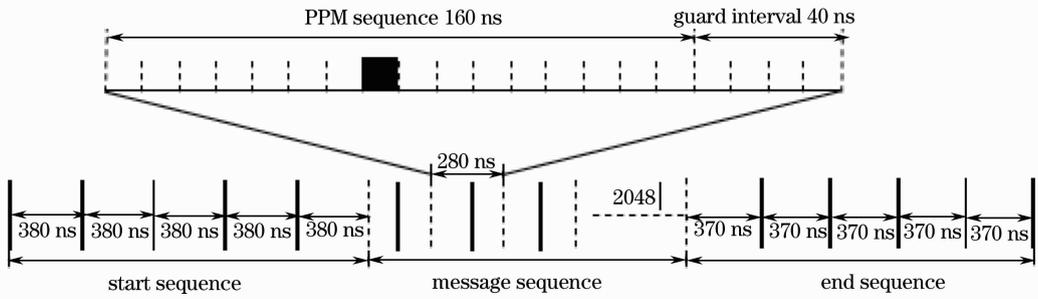


图 2 PPM 帧结构

Fig. 2 Frame structure of PPM

一般来说,在 PPM 的帧结构中要包含一定的保护间隔。插入保护间隔的目的是防止在激光器脉冲间隔较小时,后面的光脉冲能量较弱;在没有保护间隔时还会出现两个连续光脉冲的情形,这种情况下接收端无法正确地判断光脉冲是否是由单光脉冲产生的。另一方面,光脉冲在大气传播时会出现脉冲展宽<sup>[8]</sup>的现象,为防止相邻脉冲之间发生混叠,保护间隔也是很有必要的。

插入帧头帧尾的目的主要是为了实现帧的同步,降低时钟频率累积效应的影响。对于帧头帧尾首先要求可以与实际的信息序列相区分。在信息序列中,每 20 个时隙(200 ns)中必然会出现一个光脉冲,如果信息按特定格式出现,还可能出现连续光脉冲之间间隔大于 200 ns 的情况。如果采用连续的间隔小于 200 ns 的脉冲作为帧头,则会出现后面激

光脉冲能量较弱的情况。综合考虑这些因素,最终采用了一个接近 40 个时隙的帧头帧尾间隔,分别选用 380 ns 和 370 ns 的间隔,这样既不会使激光器因脉冲间隔变化太大造成能量变化很大,又与实际的信息序列加以区分。

FPGA 调制采用 100 MHz 时钟,单个脉冲的脉宽为 10 ns。采用 16-PPM 时,PPM 每 4 bit 数据占用 16 个时隙共计 160 ns,加上每 4 bit 数据后的四个保护时隙共计 200 ns,这样可以认为每 200 ns 可以传递 4 bit 信息,通信速率为 20 Mbit/s。

### 3.2 接收模块

接收模块包括:雪崩二极管(APD)光电探测电路、前置放大电路、增益控制放大电路、高速比较电路、高压(HV)控制电路、温度补偿电路、FPGA 控制解调模块,如图 3 所示。

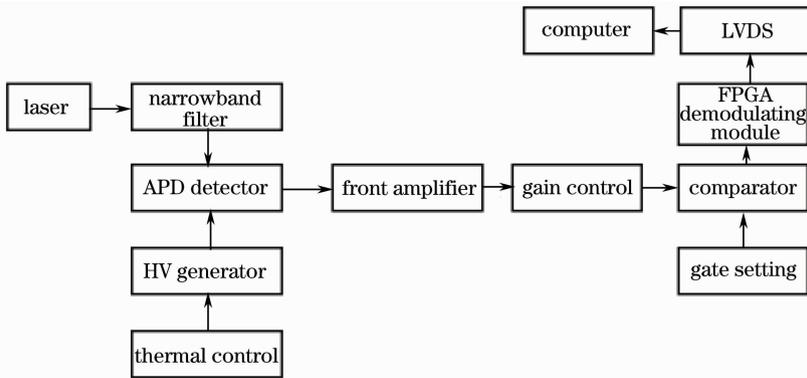


图 3 接收模块框图

Fig. 3 Block diagram of receiving module

框图中通信光接收部分主要完成激光瞄准接收功能,采用四个望远镜组成阵列,提高接收孔径,窄带滤波片的作用是滤除不必要的杂散光;APD 探测电路主要完成光信号到电信号的转换;温度补偿电路和高压控制电路为 APD 光电探测电路提供必要的温度控制和高压;前置放大电路将 APD 探测的输出信号进行进一步放大,放大后的信号再经过增

益控制模块进行幅度调节。增益控制主要是为了克服大气环境变化造成信号幅值变化而产生的影响,高速比较电路将增益控制放大电路输出的信号与设定的比较阈值相比较从而得到数字信号。该数字信号作为接收到的信号送入 FPGA 中进行解调。解调结果经 LVDS 接口发送至星载计算机。

光接收机对光的接收采用高灵敏度的 APD 探

测,噪声系数为  $20 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,取  $200 \text{ MHz}$  的带宽时,计算噪声为  $V_{\text{noise}} = 20 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{2 \times 10^8 \text{ Hz}} = 28.28 \text{ mV}$ 。APD 在  $1060 \text{ nm}$  波段的灵敏度为  $200 \text{ kV/W}$ ,当激光信号产生的响应与噪声幅值相等时,接收机工作在正确接收信号的临界状态,将此时对应的光信号功率作为探测器的探测极限,通过计算得到这种状态时对应的光功率为  $1.414 \text{ nW}$ ,换算为  $\text{dBm}$  大约为  $-58.496 \text{ dBm}$ 。

### 3.3 可编程逻辑门器件解码模块

对于 PPM 信号的解码,传统做法是采用一个速率远高于调制时钟的采样时钟对 PPM 信号进行过采样,从过采样信号里提取脉冲之间的时间信息。而在本系统里面,PPM 的调制时钟为  $100 \text{ MHz}$ ,在这种情况下如果对信号进行过采样,需要 FPGA 工作在  $400 \text{ MHz}$  时钟上(假设 4 倍采样,低速时常用 8 倍过采样),这不仅在 FPGA 的选型上有很大困难,对于 FPGA 逻辑实现时的时序约束以及功耗控制和稳定性方面也是很大的挑战,难以实现。

数字通信中另一种常用的信号同步的方式是通过锁相环恢复时钟<sup>[9]</sup>。而对于 PPM 通信,因为

PPM 信号各个脉冲时间间隔较长(20 个时隙中仅有一个脉冲),要使用锁相环进行时钟恢复,要对信号进行延时处理及相关运算<sup>[6]</sup>,并且需要有额外的锁相电路,系统设计复杂。

针对以上这两种情况和本系统  $20 \text{ Mbit/s}$  的高速通信,本设计中采用了直接用接收端时钟同步 PPM 信号的方法对 PPM 进行解调。基本原理是 PPM 发送端和接收端采用同样的晶振作为时钟,从而可以做到通信双方时钟频率相同。但是因为两个时钟之间没有固定的相位关系,如果直接使用本地时钟进行同步,很有可能发生 PPM 信号的上升沿与采样时钟的上升沿同时到达的情况(图 4 中的  $0^\circ$  时钟对应的采样情况),这样 FPGA 内部会采到一个不确定的信号(亚稳态现象),该信号会被随机判定为高电平或低电平,有可能产生一个脉冲宽度的错位,造成解码错误。为避免这种情况的产生,设计中采用 4 个相位同步接收数据并解码,依据最大似然法选取最优的结果作为解码结果,从而克服 FPGA 产生亚稳态造成解码错误的问题。

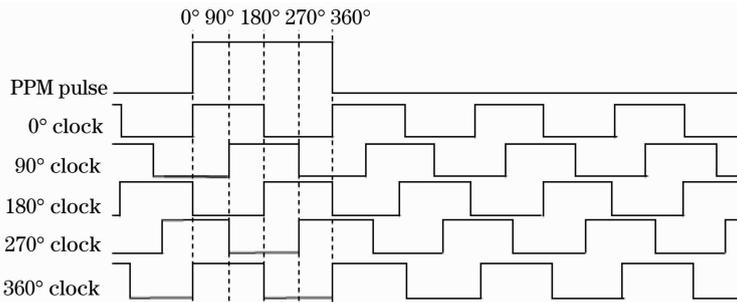


图 4 PPM 不同采样点位置示意图

Fig. 4 Different sample positions of PPM pulse

接收端采用本地时钟进行同步时,本地时钟与发送端时钟频率差异和相位差异是整个同步解调系统中最为关键的一部分,因此针对两个时钟的频率差异以及不同相位偏移的影响进行了仿真分析。在仿真中,如图 4 所示, $0^\circ$ 相移代表采样点刚好位于 PPM 脉冲开始的位置, $360^\circ$ 相移代表采样点刚好位于 PPM 脉冲结束的位置,仿真结果如图 5 所示。从结果可以看出在不同频移情况下,每次同步后最大帧长有着显著变化,并且正负频移的两种情况对最大帧长有着完全相反的影响。只有当相位偏差为  $180^\circ$ (采样点刚好位于脉冲中心)时,正负频率偏移时最大帧长才可以得到比较好的保证,解码结果也是最理想的。在同样的相位下,随着频率偏差增大,最大帧长急剧下降,因此选择频率误差(发送机

和接收机晶振频率差异)较小的晶振是这种 PPM 解码的关键因素。

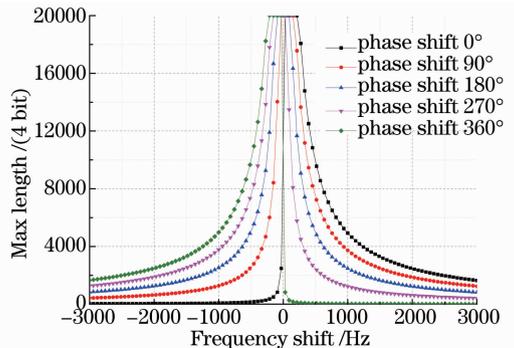


图 5 频率相位偏移与最大帧长关系

Fig. 5 Relationship between frequency/phase shift and max frame length

在实际设计中,通过对四个相位解码的动态选择可以保证采样点位于脉冲中心附近,对于长时间的频率漂移累积效应可以通过帧头的同步加以消除,因此发送端晶振和接收端晶振的频率偏差(包含两个晶振之间的绝对频差和短时间的频率漂移)成为影响帧长的关键因素。设计中为了尽可能地增加最大帧长,保证信息传输的可靠性,最后选用了精度和稳定度都很高的恒温晶振作为调制和解调的时钟源。

四相位同步提取的基本原理(见图 6)是将

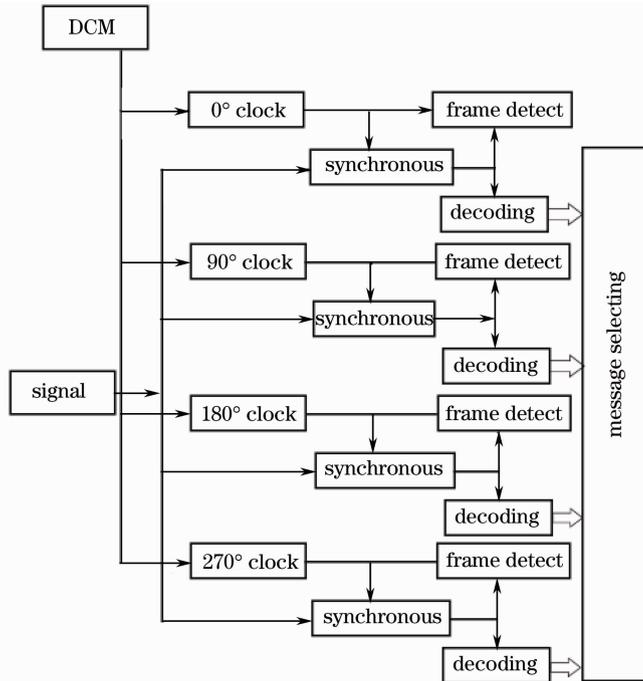


图 6 频率相位偏移与最大帧长关系

Fig. 6 Block diagram of PPM demodulating module

利用四个相位同时进行信号同步与信号解码实际上相当于在一个数据位宽度中通过不同相位进行四次采样,实际效果等效于用一个四倍速的时钟进行过采样,这样做的优点是 FPGA 工作在较低的时钟频率,更易于综合实现。

另外,结合信源的纠错编码以及通过判断一帧结束时是否正常检测到帧尾信息也可以有效地判断接收是否准确,从而实现可靠通信。

## 4 实验结果

系统联调时采用如图 1 所示的测试方案,发送 FPGA 板产生的 PPM 调制信号控制激光器输出 PPM 光脉冲,脉冲信号经过衰减(模拟大气环境衰减)后到达光电接收板,经光电转换与比较器之后输出数字信号,该数字信号经阻抗匹配后送入另一块 FPGA 板进行解调输出与误码率对比。同时观测

100 MHz本地时钟通过 FPGA 内部时钟管理单元(DCM)分别产生  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 相位的四个时钟,利用这四个时钟对 PPM 信号采样并进行帧头扫描,当至少两个相位时钟正确扫描到帧头信息后认为同步成功,可以开始 PPM 数据解码。解码过程也是分四个相位同时进行的,在 FPGA 内部会对四个相位时钟的解码结果进行选择,根据最大似然原理,选取出现次数最多的结果作为解码结果。

PPM 发送信号与经过光路后到接收 FPGA 板的信号,波形对比如图 7 所示,图中接收信号脉宽较发送信号有一定的传输时延与展宽。对于信号的展宽,一方面是光路传输的影响,另一方面是为了提高系统接收灵敏度而将后续比较器的比较电平降低的影响。因为在 FPGA 中通过逻辑处理对于接收信号做了边沿采样的预处理,因此即使 FPGA 采到多个高电平依然可以准确地恢复出信息序列。

为了对系统进行误码率验证,采用两种信息序列。一种是通过 Matlab 产生一段随机序列(PRBS-7),将该序列固化于 FPGA 中,FPGA 调制模块对序列进行调制后发送,接收端对 PPM 信号进行接收,因数据速率较高,直接在 FPGA 内将接收到的数据同固化的发送序列进行对比,数据每次比较 2048 帧数据,共计 16 Mbit 数据,并将对比结果通过串口上传,通过数据回传结果可以计算误码率信

息并可估算通信速率。实际测试中,系统运行 10 min,总计收到 710 组回传的误码率信息,通信速率为 18.9 Mbit/s。此处计算通信速率低于

20 Mbit/s的原因是因为加入了帧头和帧尾信息,导致通信速率降低,实际帧内部信息通信速率依然为 20 Mbit/s。

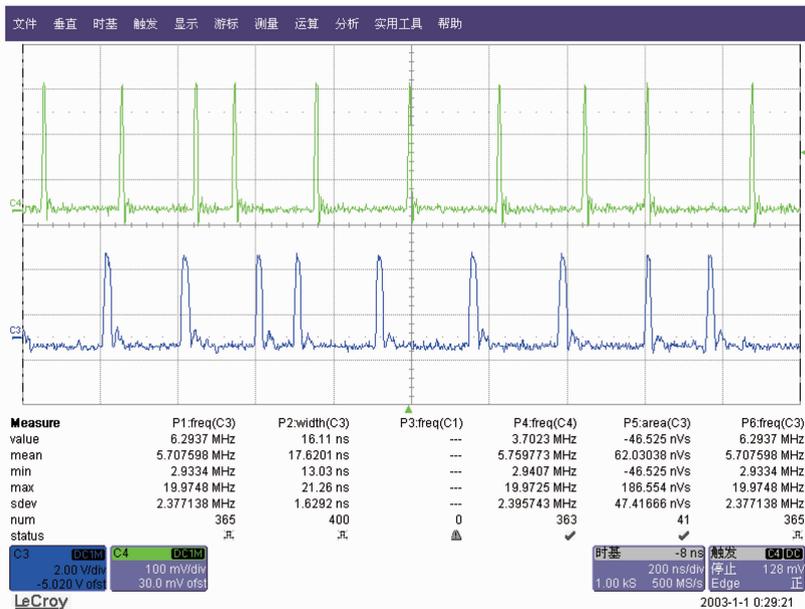


图 7 PPM 发送接收信号波形对比

Fig. 7 Comparison between sending signal and receiving signal

误码率的测试一般和光接收机的灵敏度测试密切相关,实验中采用逐步降低 PPM 发射光功率,同时观测系统误码结果的方式对系统进行测试。当系统出现误码时测量光接收机的输入光功率,以该功率作为光接收机的接收灵敏度。实际测试光接收机在输入光功率为 -56 dBm(接近 APD 的探测极限)时,系统运行 10 min,收到 710 组误码统计信息,总计出现 101 bit 错误,将误码数目与总的的数据量进行对比计算,系统误码率为  $8.9 \times 10^{-9}$ ,满足设计要求。

(ChipScope)可以实时观测 FPGA 内部信号,抓取到一组帧头数据如图 8 所示。因为完整的一帧数据量较大,这里只截取关键的帧头帧尾信息。图中第一行为解码出来的信息序列,将该序列与发送序列对比,结果相同。帧头和帧尾标志在发送序列的帧头帧尾处产生相应的脉冲,说明信息序列的帧头帧尾已被正常识别。帧有效标志为与后续模块接口的信号,在数据开始时跳变高电平,也为正常输出。同步后信号与接收信号的区别在于对宽脉冲进行取边沿,从而恢复正常的脉冲宽度,实现正确的解码。

通过 FPGA 内部集成的逻辑分析仪

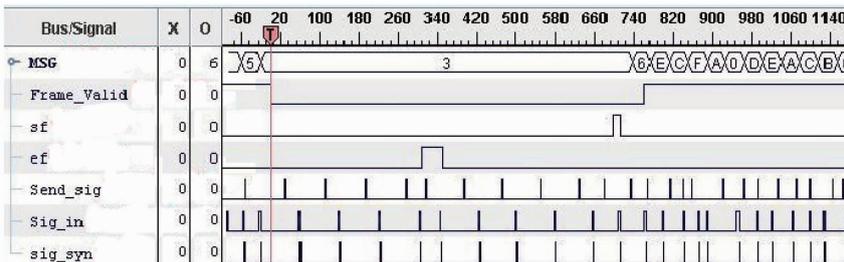


图 8 FPGA 的 PPM 解码分析

Fig. 8 Analyses of PPM decoding of FPGA

## 5 结 论

设计的 PPM 通信系统可以在不恢复通信时钟的条件下,直接采用本地时钟对 PPM 信号进行解

调。通过利用本地时钟产生四个相位时钟实现同步解调的方式,可以实现高速 PPM 信号的实时解调,有效地简化了系统设计。系统经过实际联调测试,

可以实现对于数字信号的单向传输,实际测试通信速率可以达到 20 Mbit/s,在接收光功率为  $-56$  dBm条件下,测试 10 min 系统平均误码率为  $8.9 \times 10^{-9}$ ,系统可以很好地完成通信,可用于后续的星地间图像数据信息传输实验。

### 参 考 文 献

- 1 B S Robinson, D Boroson, D Burianek, *et al.*. Overview of the lunar laser communications demonstration [C]. SPIE, 2011, 7923: 792302.
- 2 Hu Xiuhua, Zhou Tianhua, He Yan, *et al.*. Design and analysis of underwater optical communication transceiver system based on digital signal processor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305003.  
胡秀寒,周田华,贺岩,等.基于数字信号处理机的水下光通信收发系统设计及分析[J].中国激光,2013,40(3):0305003.
- 3 Hu Hao, Wang Hongxing, Sun Xiaoming, *et al.*. Multilevel coded modulation of free space optical communication based on pulse position modulation with multiple-step demodulation and decoding algorithm [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0405006.  
胡昊,王红星,孙晓明,等.基于脉冲位置调制的无线光通信多级编码调制及其多阶段解调译码算法[J].中国激光,2012,39(4):0405006.
- 4 D M Boroson, R S Bondurant, J J Scozzafava. Overview of high-rate deep-space laser communications options[C]. SPIE, 2004, 5338: 37-49.
- 5 S Constantine, L E Elgin, M L Stevens, *et al.*. Design of a high-speed space modem for the lunar laser communications demonstration[C]. SPIE, 2011, 7923: 792308.
- 6 D Caplan, M Stevens, D Boroson, *et al.*. High-sensitivity variable-rate transmit/receive architecture [C]. San Francisco: IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1999 12th Annual Meeting, 1999. 297-298.
- 7 Liu Dan, Liu Zhi, Wang Puyao, *et al.*. Anti-jamming modulation/demodulation technology of atmospheric laser communication system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0705004.  
刘丹,刘智,王璞瑶,等.一种大气激光通信系统抗干扰调制/解调技术[J].中国激光,2012,39(7):0705004.
- 8 Li Tiansong, Yuan Chaowei, Yi Miao, *et al.*. Time jitter effects on bit error probability in multi-pulse position modulation satellite optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 26-30.  
李天松,袁超伟,易淼,等.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[J].光学学报,2010,30(1):26-30.
- 9 C C Chen, C Gardner. Performance of PLL synchronized optical PPM communication systems [J]. IEEE Trans on Commun, 1986, 34(10): 988-994.

栏目编辑:王晓琰