

无线光通信中基于 FPGA 的高效编码调制器设计

徐建武 王红星 胡昊 刘敏

(海军航空工程学院电子工程系, 山东 烟台 264001)

摘要 基于无线光信道和脉冲位置调制(PPM)信号的特点,将 Turbo 乘积码(TPC)引入其中,完成了 Turbo 乘积码和 PPM 调制硬件电路的设计制作。分别对系统能获得的调制增益和编码增益进行了详细的实验测试,证明了该设计方案可行,实验结果表明:在信息速率为 155.52 Mb/s,闪烁指数为 0.1,调制阶数 $M=4$,误码率(BER)为 10^{-6} 的条件下,与开关键控(OOK)调制系统相比,PPM 调制方式原理样机可获得 9.03 dB 的调制增益,TPC 编译码原理样机可获得 4.2 dB 以上的编码增益。该模块的应用将能够极大地提升无线光通信系统的性能。

关键词 光通信;无线光通信;脉冲位置调制;Turbo 乘积码;现场可编程门阵列

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.100602

Design of High Efficiency Modulator and Encoder Based on FPGA in FSO Communication System

Xu Jianwu Wang Hongxing Hu Hao Liu Min

(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract Based on the characteristic of free space optical (FSO) channel and pulse position modulation (PPM) signal, by introducing turbo product code (TPC) in PPM modulation, the hardware circuit of the TPC-PPM coded modulation structure is accomplished. Modulation gain and the code gain are tested experimentally, and it is proved that the design proposal is feasible. The experimental result indicates that under the condition that the information speed is 155.52 Mb/s, scintillation index $\sigma^2 = 0.1$, modulation index $M = 4$ and bit error ratio (BER) is 10^{-6} , compared with the on-off keying (OOK) system, the PPM modulation principle prototype possesses a modulation gain of 9.03 dB and the code gain of TPC is more than 4.2 dB. The application of this module can greatly improve the performance of FSO communication system.

Key words optical communications; free space optical communication; pulse position modulation; turbo product code; field programmable gate array

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 010.1330

1 引言

当前,无线光通信(FSO)引起了国内外的广泛关注,它能够满足当前的大数据量数据传输要求,传输速率高、带宽宽而且保密性好,能有效地解决“最后一公里”接入问题^[1,2],具有良好的应用前景。在 2000 年悉尼奥运会期间,美国的 Terabeam 公司在水上中心与演播中心之间建立了 8 波道的无线数据通信链路,运行期间始终保持畅通,效果良好,并成功地利用 FSO 设备向客户提供了 100 Mb/s 的数据连接。美国的 Airriber 公司在波士顿地区将 FSO 通信网与同步光纤网络(SONET)通过光节点连接在一起,完成了该地区整个光网络的建设。

收稿日期: 2011-03-03; **收到修改稿日期**: 2011-05-04; **网络出版日期**: 2011-08-06

基金项目: “泰山学者”建设工程专项经费资助课题。

作者简介: 徐建武(1982—),男,博士研究生,主要从事无线光信道评估、数字调制编码技术等方面的研究。

E-mail: xujianwu820215@126.com

导师简介: 王红星(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信技术、现代通信新技术等方面的研究。

E-mail: 13371368601@cumail.com.cn

国内 FSO 的发展还基本处于起步阶段,研究大气激光通信的最具代表性的单位有电子科技大学、中国电子科技集团公司第三十四研究所、华为技术有限公司、清华同方有限公司、中国科学院成都光电技术研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、北京大学和哈尔滨工业大学等。

无线光信号在大气中传输时要受到大气的影 响,大气对无线光信号的衰减和湍流作用导致了传输距离的有限以及传输误码率的急剧增大,而出于安全考虑激光源的功率不能太高,因而无线光通信在军事领域的应用目前还受到很大的限制^[3]。而采用性能优异的调制编码方案能够提高系统的数据传输率、抗干扰能力,同时降低系统的误码率,改善系统的性能。因此,开展无线光通信的调制与编码技术的研究,使用性能优异的调制编码方案改善系统的性能,使之能够为军事通信服务成为了当务之急。

脉冲位置调制(PPM)可以有效提高系统的功率利用率,应用在大气湍流中时具有性能优势,因此成为无线光通信优先选择的调制方式之一^[4]。但 PPM 作为一种高阶调制方式,发生误解调时可能会在分组内出现多个比特错误,使得解调信号呈现出突发错误特性,同时,由于大气衰减作用,大气光通信系统为弱信号检测,大气湍流运动使得光信号呈现深度衰落和随机衰落特性,加上接收电路噪声的影响,容易出现接收符号的连续错误,又因 PPM 误解调引起的多比特出错,就会形成长串的突发错误,使得错误情况大大超出码字纠错能力,导致普通编码在该调制方式下有效性较差^[5]。

基于无线光信道和 PPM 信号的特点,本文在 PPM 调制中引入 Turbo 乘积码(TPC),将 TPC 码引入其中,完成了 TPC 码和 PPM 调制的硬件电路的设计制作,并对调制增益和编码增益大小进行了详细的实验测试。实验结果表明该设计方案可行,且性能优异,可获得 9.03 dB 的调制增益,4.2 dB 的编码增益。

2 TPC-PPM 系统模型

系统如图 1 所示。信息进入编码器后首先作乘积编码,具体为先行编码后列编码,然后逐行送入调制器调制为 PPM 符号,再转换为光信号进行发送,在接收端,经雪崩光电二极管(APD)检测的接收电流经解调后送入译码器。其中发送端的 TPC 码行列编码可等效为在两个编码器间的行列交织过程,这实现了短码构造长码,已编码块的行输出方式则相当于在调制器前加入了一个行列比特交织器,其等效模型如图 1 中虚线框所示。因此,模型可以看做是一种在接收端采用软输入软输出(SISO)迭代译码的比特交织级联编码调制方式。

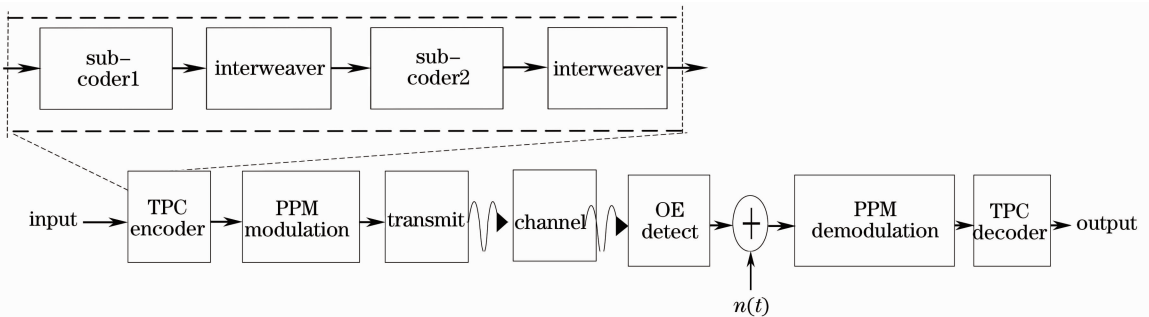


图 1 大气无线光通信 TPC-PPM 编码调制系统模型

Fig. 1 TPC-PPM modulation and coding system model of FSO

由图 1 可以看出,系统的抗突发错误能力主要来自其编/译码方法和数据输出方式。编码器的第二个子编码器为列编码,而输出为逐行输出方式,相当于在编码和调制间引入了一个行列比特交织器,从而将连续的突发错误打散为离散错误。受干扰接收信号重新装块后,连续错误主要表现在行数据上,而在列方向表现为分散的较少错误,能被首先进行的列译码所纠正,如 C_1 、 C_2 的码长分别为 n_1 、 n_2 ,其纠突发错误有如下特性:1) 任何长度 $L \leq n_1$ 的突发错误,经过重新装块后,成为至少被 n_2 位隔开的一些独立差错;2) 任何长度 $L > n_1$ 的突发错误,经过重新装块后,可将长突变成短突发,其突发长度为 $L' = \lfloor L/n_1 \rfloor$ 。因此,TPC 码与 PPM 相结合,不仅可以获得高功率利用率,还能对湍流和 PPM 解调引起的长串突发错误和随机错误起到很好的纠正作用^[6,7]。

3 TPC-PPM 硬件系统总体结构

系统结构如图 2 所示,在发射端,光输入信号在光电转换后进行 TPC 编码,编码后进行 PPM 调制输出;在接收端,对 PPM 解调后的数据进行 TPC 译码输出。为了实验室测试方便,本设计中,在 PPM 调制之后使信号通过误码插入序列,该误码插入序列在模拟大气信道环境的条件下产生,具体产生方法将在下面介绍。本系统可以作为单独的编码调制器或者解调译码器使用,也能使编码调制器和解调译码器同时工作,实现双工操作。

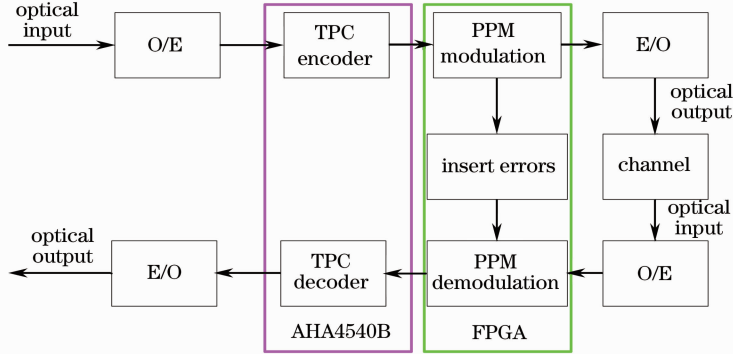


图 2 系统整体功能框图

Fig. 2 Function diagram of system

采用 155 Mb/s 单模收发器实现编码输入和译码输出端的光电转换和电光转换;因为经过调制后的信号速率在 790 Mb/s 以上,所以调制输出和解调输入端采用 1.25 Gb/s 单模收发器来实现电光转换和光电转换;TPC 编译码采用集成芯片 AHA4540B 来实现;采用 Altera 公司的 Arria II GX 系列的现场可编程门阵列(FPGA)来实现对 AHA4540B 的初始化以及编译码过程的逻辑控制。误码插入序列的产生、PPM 调制解调及同步通过硬件语言编程在 FPGA 里实现。

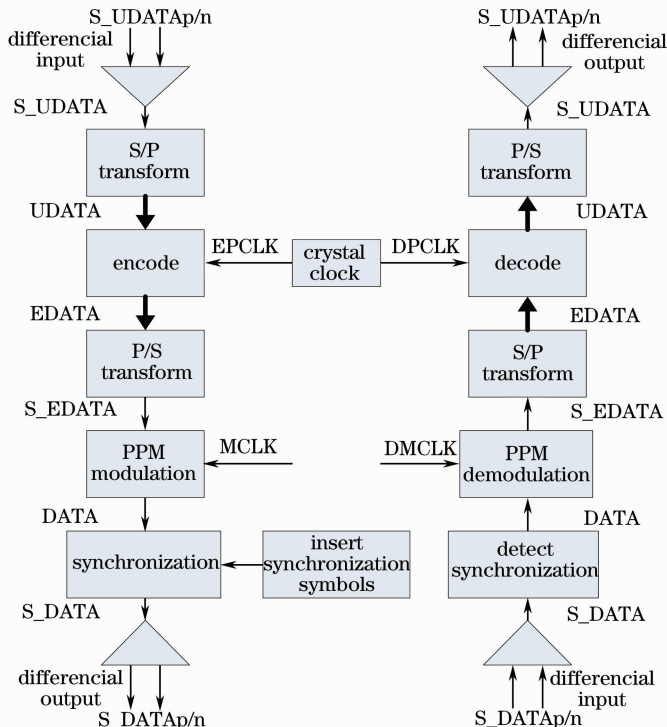


图 3 编码调制数据流设计

Fig. 3 Design of data stream

4 硬件实现关键技术

4.1 数据处理流程

系统编码调制数据处理流程如图 3 所示,编码调制的主要参数配置如下。

- 1) TPC 分量码选择:采用 $(128,120) \times (64,57)$ 的二维扩展汉明码;
- 2) 迭代次数:2次(可更改);
- 3) 编码码率:通过码字消减设计,使码率精确控制为 0.8;
- 4) 一次输入帧长:TPC 编码每次处理的数据大小为 4712 bit,经过编码和码字消减后为 5858 bit;
- 5) 编码块同步:每个 TPC 帧加入长为 32 bit 的同步码字,加上同步码字,帧长为 5890 bit。

6) PPM 调制:调制阶数设为 4 次,每 4 bit 数据调制成一个具有 16 个时隙的 PPM 符号,调制规则按照 PPM 的方法通过超高速集成电路硬件描述语言(VHDL)实现。调制完成后,再在每个 PPM 符号上插入两个肩并肩保护空时隙,并在每 9 个 PPM 符号前加入两个 PPM 空符号作为同步码,同步码中的肩并肩时隙为实时隙,以利于实现正确解调。PPM 调制序列结构图如图 4 所示。

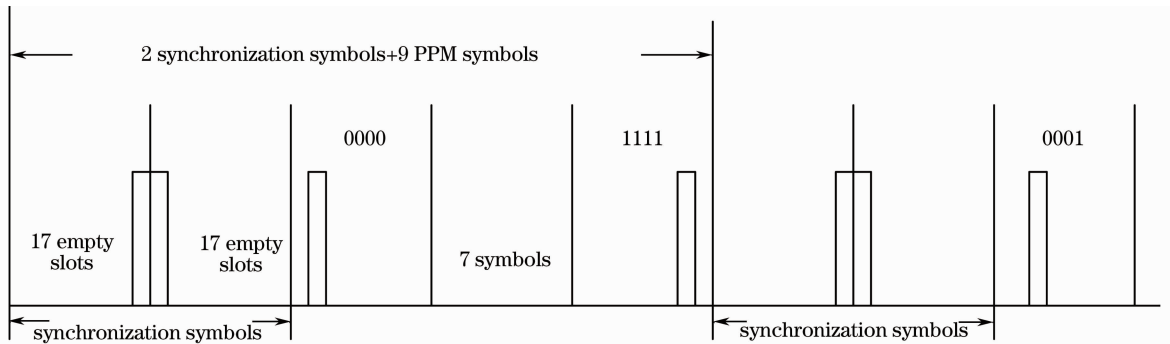


图 4 PPM 调制序列结构图

Fig.4 Structure of PPM modulation

4.2 AHA4540B 初始化配置

AHA4540B 是单芯片 TPC 专用前向纠错编/译码芯片,它综合了单个 TPC 编/译码器的功能,支持全双工或半双工操作。通过对内部寄存器的合理配置,AHA4540B 可以同时进行了编码和译码处理。通过微处理器接口与计算机连接可实现对芯片的全面编程控制,并访问芯片内部所有的寄存器,其功能框图如图 5 所示^[8]。

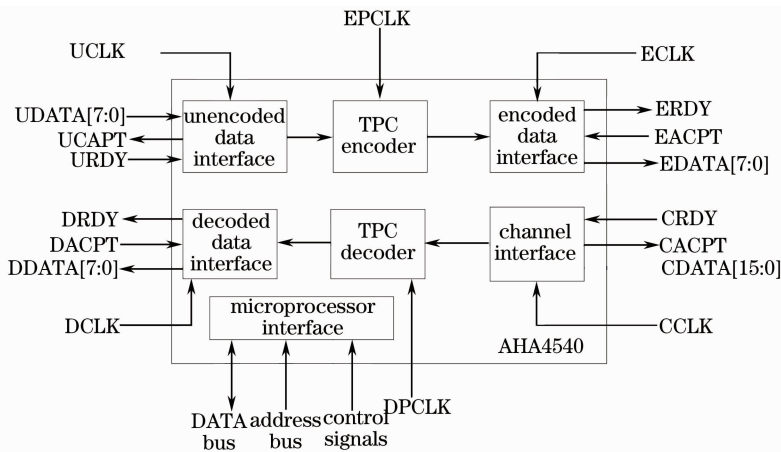


图 5 AHA4540B 芯片功能框图

Fig.5 Function of AHA4540B

AHA4540B 支持最高达 200 Mb/s 的信道速率,符号率达 50 Msym/s,且编码时延较小(小于 10 个时钟周期),支持码率范围在 0.25~0.98 之间可调,码块大小在 256 bit~16 kbit 之间可选,并且每个码块的译码迭代次数可编程控制。AHA4540B 支持多种调制方式如 BPSK、QPSK、8-PSK 和 16-QAM 等,还具有内部

同步符号的插入和检测功能,同步符号长度可达 32 bit。

初始化模块是系统编程设计的核心部分,主要功能是完成对 AHA4540 芯片的初始化。通过初始化过程对 AHA4540 内部寄存器写入不同的配置值,可以支持多种数据流格式及编/译码控制方式。在本设计中微处理器采用 Motorola 方式(PROCMODE 为 1),MUXMODE 设为 0。图 6 给出了初始化模块的设计图,配置过程的具体实现方法这里不做详细介绍。

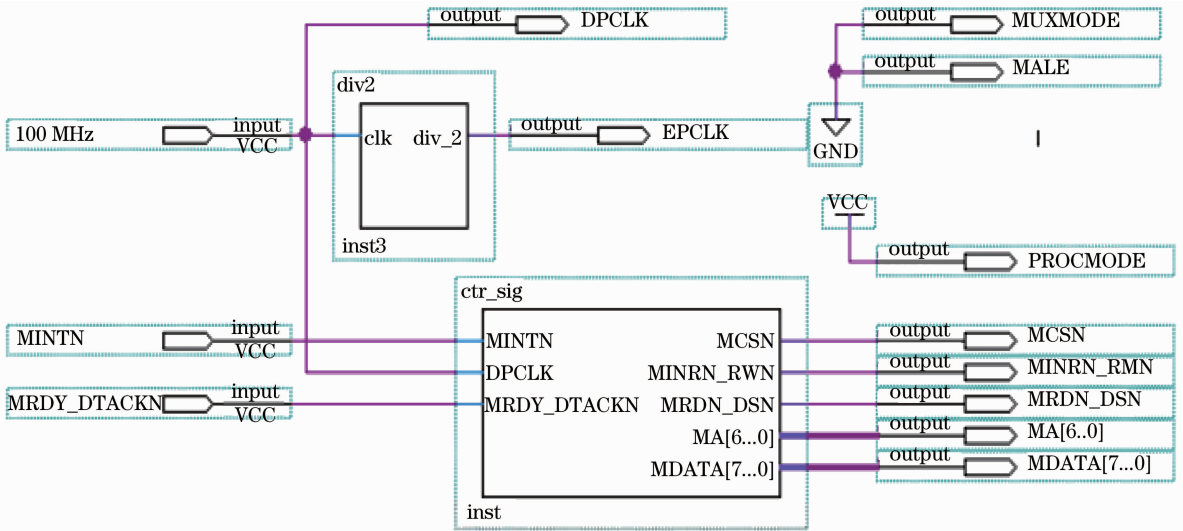


图 6 初始化模块设计

Fig. 6 Design of initialization module

4.3 时钟管理

时钟管理分两块:首先采用一个 100 MHz 的外部晶振作为 AHA 的译码处理时钟 DPCLK,100 MHz 二分频后作为 AHA 的编码处理时钟 EPCLK。其次,外部差分时钟在 FPGA 内部转换成单端时钟后,经过时钟处理芯片 PI6C18551 分成两路同频同相的时钟,频率大小都为 155.52 MHz。一路先经过 8 分频得到 AHA 的编码输入时钟 UCLK,大小为 19.44 MHz,同时作为 FPGA 内部 PLL 的输入,得到两路输出为 24.3 MHz 和 194.4 MHz,分别作为 AHA 的译码输出时钟 ECLK 和译码串行输出时钟 S_ECLK;另一路直接经过锁相环(PLL)输出两路时钟,一路作为调制输出时钟 DCLK,速率为 777.6 MHz,另一路作为同步处理后系统的输出时钟 S_DCLK,再经过 FPGA 的差分输出接口,以 LVDS 格式输出。

4.4 误码序列的生成

误码序列的作用是通过计算机模拟大气无线光信道的特点,将大气对无线光信号的影响通过一个误码序列表示出来,误码序列的产生分以下步骤。

1) 在仿真环境下构建典型大气无线光通信信道模型。无线光信道包含光信道和接收机信道两部分,其中光强闪烁经孔径平滑后表现为弱湍流分布,接收机噪声表现为高斯噪声,因此典型无线光通信信道为弱湍流和高斯级联信道。图 7 为其模型结构,用两个高斯信号模拟,其中 x_1 为方差为 σ_x^2 ,均值为 $-\sigma_x^2$ 的高斯信号源, x_2 为方差为 σ^2 ,零均值的高斯信号源。 x_1 产生的随机数据送入 exp 函数中并与发射信号相乘以模拟光信号经过弱湍流的情况, x_2 用于模拟接收机的附加噪声, η 为光电转换因子。

2) 仿真计算误码插入序列。在一定信噪比条件下,信源发送序列经过大气无线光通信信道后,在接收端将得到含有误码的接收序列,将发送序列与接收序列进行逐比特比较,可得到发送比特序列的错误比特序列,在此称之为误码插入序列,它反映了无线光通信信道的特点。

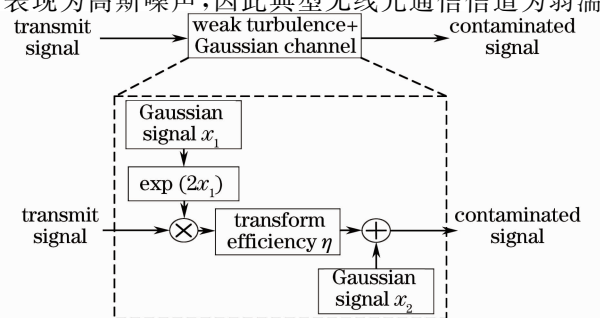


图 7 弱湍流高斯级联信道及其等效模型

Fig. 7 Weak turbulence Gaussian channel and its equivalent model

图 8 为误码插入序列生成示意框图。

3) 将误码插入序列存成 error.MIF 文件存储在计算机中以供 FPGA 调用。图 9 为误码插入模块的 VHDL 实现图,其中 ROM1 调用的是误码插入序列 error.MIF 文件。

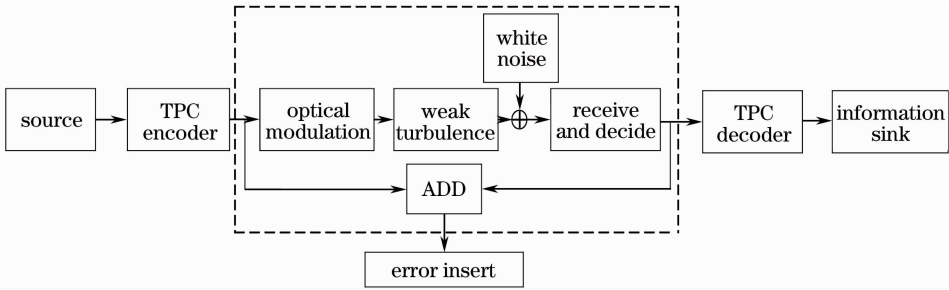


图 8 仿真环境下的误码插入序列生成

Fig. 8 Generation of error serials in simulation environment

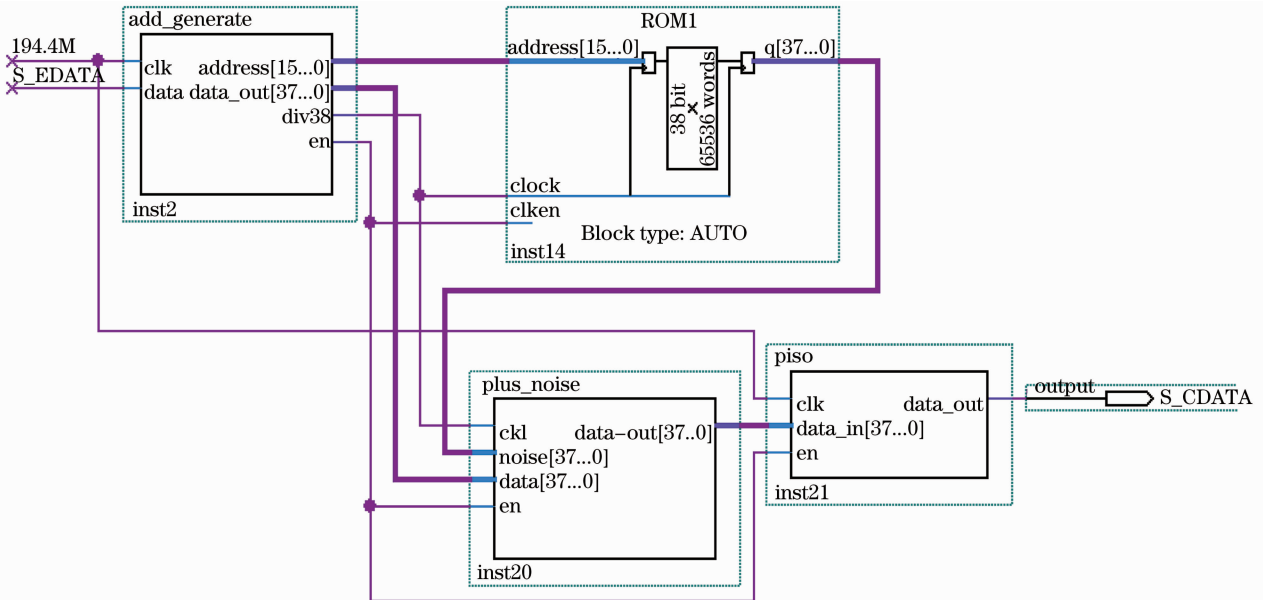


图 9 误码插入模块的 VHDL 实现

Fig. 9 VHDL implement of error insert module

4.5 消除毛刺的方法

毛刺并不是对所有的输入都有危害,只要毛刺不出现在时钟的沿口并且不满足数据的建立和保持时间,就不会对系统造成危害^[9,10]。一般情况下毛刺很短,多为几纳秒,基本上都不可能满足数据的建立和保持时间,但是如果将带毛刺的信号直接作为系统的启动信号、预置信号、触发器的清零信号、握手信号、时钟信号或者锁存器的输入信号时就会产生逻辑错误,可能会导致严重的后果,所以在设计电路时必须检查设计中所有时钟、清零和置位等这些对毛刺十分敏感的输入端口,确保它们没有任何毛刺。

在本文的软件程序设计中,主要用以下两种方法来消除毛刺:1)D 触发器锁存法;2)状态机控制法。

1) D 触发器锁存法

一般说来,毛刺出现在信号发生电平转换的时刻,也就是说在输出信号的建立时间内会出现毛刺,而在输出信号的保持时间内是不会有毛刺信号出现的。对于 D 触发器的 D 输入端,只要毛刺不出现在时钟的上升沿并且不满足数据的建立和保持时间,就不会对系统造成危害,因此可认为 D 触发器的 D 输入端对毛刺不敏感。利用这一特点,在输出信号的保持时间内,用 D 触发器读取组合逻辑的输出信号。由于在时钟的上升沿时刻,输出端 $Q=D$,当输入的信号有毛刺时,只要不发生在时钟的上升沿时刻,输出就不会有毛刺。

在本设计中,经计数处理后得到需要的控制信号 MWRN_RWN 和 MRDN_DSN。若控制信号直接输出,则输出时产生了毛刺,如图 10 所示。若在控制信号输出前先经过 D 触发器,则毛刺得到了消除,如图 11

所示,但同时系统会产生 4 个时钟周期左右的延迟。

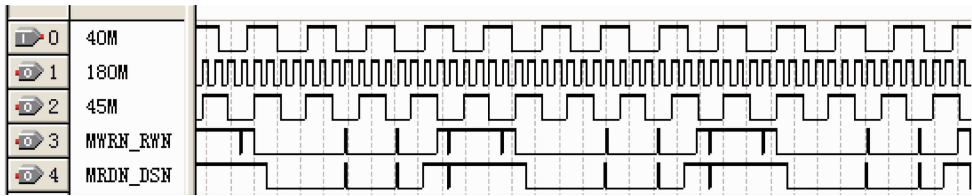


图 10 带毛刺的信号

Fig. 10 Signals with burrs

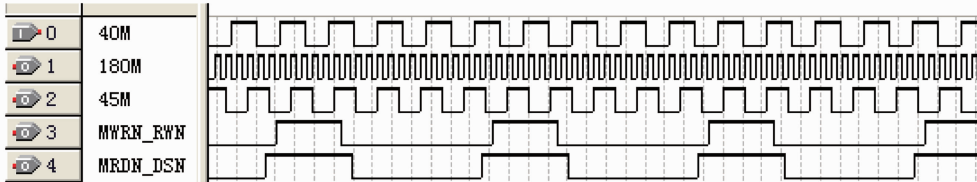


图 11 消除毛刺后的信号

Fig. 11 Signals without burrs

2) 状态机控制法

在数字系统中,状态机的灵活使用能实现信号的同步和达到消除毛刺的目的。在数据传递比较复杂的多模块系统中,由状态机在特定的时刻分别发出控制特定模块的时钟信号或者模块使能信号,状态机的循环控制就能使得整个系统协调运作,同时减少毛刺信号。只要在状态机的触发时间上加以处理,就可以抑制毛刺的产生。

在本文的设计中,计数器 count(4:0)在 0~19 重复计数,如果不采用状态机控制法,则在从状态“00001”向状态“00010”转变时,因为有两位信号同时发生改变,所以必然产生毛刺。但是如果采用状态机控制法,通过 VHDL 语言编程使得每一状态变化时只有一位信号发生改变,这样就能达到消除毛刺的目的。这里可以设计如表 1 所示的状态表,从表中可以看出,从每个状态转移到下一个状态,都只有一个信号位发生改变,这样就能破坏毛刺产生的条件,从而消除毛刺。

表 1 状态机状态表

Table 1 State table of the state machine

State	Value	State	Value	State	Value	State	Value
1	00101	6	00010	11	01100	16	01110
2	00100	7	00110	12	01000	17	11110
3	00000	8	00111	13	01001	18	10110
4	00001	9	01111	14	01011	19	10100
5	00011	10	01101	15	01010	20	10101

5 测试方法和过程

5.1 PPM 调制增益测试

- 1) 准备好测试用电源、示波器、计算机、待测试电路板及调制/解调模块程序。
- 2) 检查电源电压、输出电流是否能达到要求。
- 3) 检查电路连接,确定板上电源线与电源连接好,调制输出信号直接正确连接到解调输入端,电路板与计算机通过 JTAG(Joint Test Action Group)口正确通信。
- 4) 运行 Quartus9.1sp2 软件,打开下载界面(点击 Quartus 软件主页面工具栏上的 programmer 按钮),接通电源,将编译好的调制模块程序 ppm_modulation. sof 文件下载到板上 FPGA 之中。
- 5) 将示波器探头接入信源信号输出端(测点位置见图 12),测试脉冲宽度 t_{OOK} 和 t_{PPM} 参数,并记录结果。PPM 调制增益实测图如图 13、图 14 所示。

6) 在同一发射光源下 $P_{PPM} = P_{OOK}$, t_{symbol} 为一个符号的时间长度, 则调制增益可以表示为

$$f_{gain} = 10\lg P_{ave_OOK} - 10\lg P_{ave_PPM} = 10\lg\left(\frac{P_{OOK} \times t_{OOK} M}{P_{PPM} \times t_{PPM}}\right) = 10\lg\left(\frac{t_{OOK} M}{t_{PPM}}\right), \quad (1)$$

式中 M 为调制阶数, P_{PPM} , P_{OOK} 分别为 PPM 调制后和直接开关键控 (OOK) 调制发射光信号的峰值功率。经 PPM 调制后其平均功率计算方法为 $P_{ave_PPM} = \frac{P_{PPM} \times t_{PPM}}{t_{symbol}}$, 直接输出 OOK 信号的平均功率计算方法为

$$P_{ave_OOK} = \frac{P_{OOK} \times t_{OOK} M}{t_{symbol} \cdot 2}.$$

7) 将两组测试记录数据代入(1)式并计算出结果。

表 2 PPM 调制增益测试记录单

Table 2 Modulation gain of PPM

Test object	Value / ns	Gain / dB
Pulse width t_{OOK}	5.1663	9.07
Pulse width t_{PPM}	1.2797	

值得注意的是, 采用 PPM 的最大好处是能降低系统的平均功率, PPM 在带来调制增益的同时, 随着接收脉冲宽度的变窄, 将导致系统带宽需求的增加, 以及接收机噪声的增加, 这是不可避免的。下面进行定量的分析。由于脉冲宽度的倒数对应于系统的带宽需求, 由表 2 的实测数据可知, OOK 系统的带宽需求为 $B_{OOK} = 1/t_{OOK} = 0.194$, 对于调制阶数为 4 的 PPM 系统来说带宽需求为 $B_{PPM} = 1/t_{PPM} = 0.793$, 因此存在以下关系: $B_{PPM} \approx 4B_{OOK}$ 。因此 4 阶 PPM 调制的带宽需求约为 OOK 系统的 4 倍。而理论值为^[4] $B_{PPM} = 2^M/M$, 由于 $M = 4$, 因此, 理论上 $B_{PPM} = 4B_{OOK}$, 将测试数据和理论值对比可以看出实测值与理论值是一致的。正是由于系统带宽需求的增加, 导致接收机接收带宽增加, 接收噪声也将随之增加, 限于篇幅这里不做深入的定量分析。

由以上实测实据和分析可知, PPM 调制的实质就是用增加带宽来换取调制增益。而对于无线光通信系统来说, 带宽资源非常丰富, 也因此说明了 PPM 调制非常适合应用在 FSO 通信系统中。

5.2 TPC 编码增益测试

1) 准备好测试用电源、示波器、液晶显示屏、计算机、待测试电路板。

2) 将板上电源线与电源连接好, 将液晶显示屏接口接入电路板扩展接口, 并将编码输出信号直接连接到译码输入端。检查电路连接是否正确。

3) 一定信噪比下, 在计算机里用 Matlab 仿真生成一组误码序列, 存储到 error.MIF 文件中, 该误码插入序列能模拟弱湍流条件下无线光通信信道的特征。

4) 将编码后的序列通过误码插入模块, 将生成的 error.MIF 插入, 使编码输出序列与 error.MIF 中的数据逐个进行异或运算, 插入误码的序列再连接到译码输入端。

5) 将 USB-Blaster 串行下载线的一端与电路板上的十针 JTAG 口相连, 然后把另一端与 PC 机连接, 并确认驱动程序安装良好。

6) 打开 Quartus9.1sp2 软件下载界面, 点击左上角 Hardware Setup, 将硬件配置选中 USB-Blaster, 然

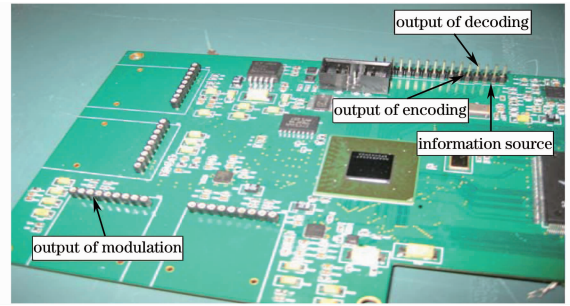


图 12 信号测试点图

Fig. 12 Signal test points

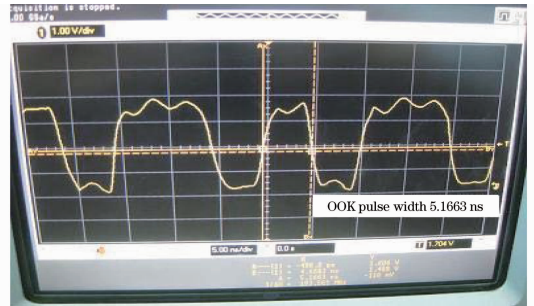


图 13 开关键控调制脉冲宽度实测图

Fig. 13 Pulse width of OOK

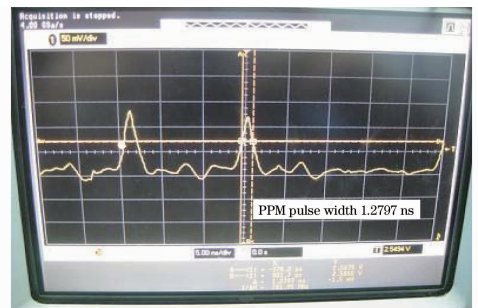


图 14 PPM 脉冲宽度实测图

Fig. 14 Pulse width of PPM

后点击添加文件,选中编译好的 debug_DB. sof 文件。

7) 接通电源,按下电路板上的复位键,在下载程序前将 FPGA 和 AHA4540 复位一次。

8) 将编译好的 debug_DB. sof 格式文件下载到板上 FPGA 之中。通过液晶显示屏 1602 查看总误码数,并记录结果。图 15 为系统通电示意图。

9) 计算误码率(BER): $R_{BE} = N_{BE} \times 10^{-9}$, N_{BE} 表示总误码数。图 16 为误码插入序列加于 TPC 硬件模块、误码计算及结果输出示意图。

10) 在多组不同信噪比下产生 MIF 文件,重复上述步骤 4)~9),根据测试结果绘出不同信噪比下的误码性能曲线。

11) 与未编码的仿真性能曲线进行比较,计算编码增益,并记录结果。

测试数据如下:输入速率 155.52 Mb/s,TPC 分量码为(128,120)×(64,57)的二维扩展汉明码,码率为 0.8,迭代次数为 2。

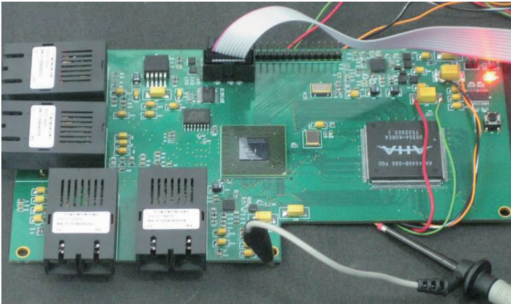


图 15 系统通电示意图

Fig. 15 Diagram of system on power

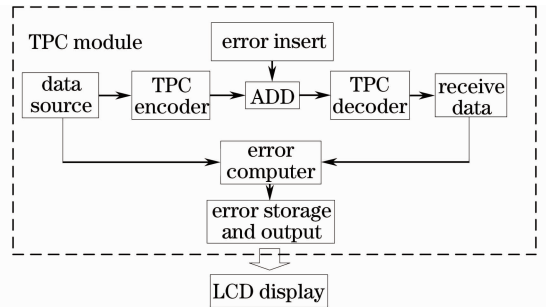


图 16 误码序列插入、误码计算及结果输出示意图

Fig. 16 Diagram of error insert computer and result output

表 3 TPC 误码率测试结果

Table 3 Test BER result of TPC

OOK SNR /dB	Scintillation index	Data number	Error numbers	Total bits	BER
11	0.1	First	38196259	10^9	3.8196259×10^{-2}
		Second	38172221	10^9	3.8172221×10^{-2}
		Third	38624939	10^9	3.8624939×10^{-2}
12	0.1	First	28678921	10^9	2.8678921×10^{-2}
		Second	28606526	10^9	2.8606526×10^{-2}
		Third	28765038	10^9	2.8765038×10^{-2}
12.5	0.1	First	18829583	10^9	1.8829583×10^{-2}
		Second	18717632	10^9	1.8717632×10^{-2}
		Third	18708761	10^9	1.8708761×10^{-2}
13	0.1	First	9209348	10^9	9.209348×10^{-3}
		Second	9296866	10^9	9.296866×10^{-3}
		Third	9273920	10^9	9.273920×10^{-3}
13.5	0.1	First	2082128	10^9	2.082128×10^{-3}
		Second	2057603	10^9	2.057603×10^{-3}
		Third	2066557	10^9	2.066557×10^{-3}
14	0.1	First	241877	10^9	2.41877×10^{-4}
		Second	240231	10^9	2.40231×10^{-4}
		Third	247791	10^9	2.47791×10^{-4}
15	0.1	First	70	10^9	7.0×10^{-8}
		Second	71	10^9	7.1×10^{-8}
		Third	75	10^9	7.5×10^{-8}

根据表 3 中的实际测试数据,可以得到编码模块性能测试曲线,如图 17 所示。由图 17 可以看出,当信息速率为 155.52 Mb/s 时,在闪烁指数为 0.1,误码率为 10^{-6} 的条件下,与 OOK 系统相比,可获得 4.2 dB

以上的编码增益。

通过上面测试的结果,对比 OOK 和 OOK+TPC 系统的性能差异,能充分说明 TPC 编码带来的好处。考虑到 PPM 调制的作用主要是节省平均发射功率,对系统误码率的降低作用不明显,因此 PPM 和 PPM+TPC 二者的误码率性能对比在这里不做讨论。可以说,PPM 调制和 TPC 编码的结合,既充分发挥了 PPM 调制能有效降低系统平均发射功率的好处,又能利用 TPC 编码良好的纠错功能的优点。

6 结 论

基于无线光信道和 PPM 信号的特点,将 TPC 码引入其中,完成了高效 TPC-PPM 编码调制器硬件电路的设计制作,并进行了实验测试。实验结果表明,该方案能获得很好的编码调制性能,在信息速率为 155.52 Mb/s,闪烁指数为 0.1,调制阶数 $M=4$,误码率为 10^{-6} 的条件下,与 OOK 系统相比,PPM 调制方式原理样机可获得 9.03 dB 的调制增益,TPC 码编译码原理样机可获得 4.2 dB 以上的编码增益。将该 TPC-PPM 编码调制模块应用于 FSO 通信系统时,能极大地改善系统的性能,提高 FSO 系统的抗差错能力。此外,该模块以 FPGA 为设计基础,可移植能力强,只需做简单的修改,就能应用在其他通信领域。

参 考 文 献

- Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Outage probability of free space optical communication over atmosphere turbulence[C]. 2010 WASE International Conference on Information Engineering. 2010, **4**: 127~130
- Su Lei. Wireless optical communication and its application[J]. *Optical Communication Technology*, 2002, **26**(4): 22~25
苏 磊. 无线光通信技术及其应用[J]. 光通信技术, 2002, **26**(4): 22~25
- Harinder Sandhu, D. Chadha. Power and spectral efficient free space optical link based on MIMO system [C]. Communication Networks and Services Research Conference, 2008. 504~509
- S. Arnon, N. S. Kopeika. Adaptive suboptimum detection of an optical pulse-position-modulation signal with a detection matrix and centroid tracking[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(2): 443~448
- Jon Hamkins, Juan Cenicerros. The Capacity of Avalanche Photodiode-Detected Pulse Position Modulation [R]. TMO Progress Report, 1999. 42~138
- Hu Hao, Wang Hongxing, Zhou Min *et al.*. Modeling and analyzing of error performance for pulse position modulation and digital pulse interval modulation under turbulence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1269~1274
胡 昊,王红星,周 闵等. 湍流大气中脉冲位置调制和数字脉冲间隔调制差错性能的建模和仿真[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1269~1274
- Xie Weiliang, Liu Lu, Tang Junxiong. Analysis on characterization of atmospheric optical wireless communication system based on turbo code[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 575~578
谢伟良,刘 璐,汤俊雄. 无线光通信差错控制系统的时间参数特性[J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 575~578
- Comtech AHA Corporation. Product Specification AHA4501[OL]. AHA4540. 1998
- Sun Linan, Wang Xuedong. The FPGA implement of turbo product code quick coding[J]. *Communication Technique*, 2007, (4): 44~46
孙雨楠,王学东. Turbo 乘积码快速编码的 FPGA 实现[J]. 通信技术, 2007, (4): 44~46
- Wang Xiaobo, Luo Xia, Sun Jiaqi. Turbo product code and its FPGA implement[J]. *Telecontrol and Test*, 2007, **28**(2): 31~36
王晓波,罗 霞,孙甲琦. Turbo 乘积码技术及其 FPGA 实现[J]. 遥控遥测, 2007, **28**(2): 31~36

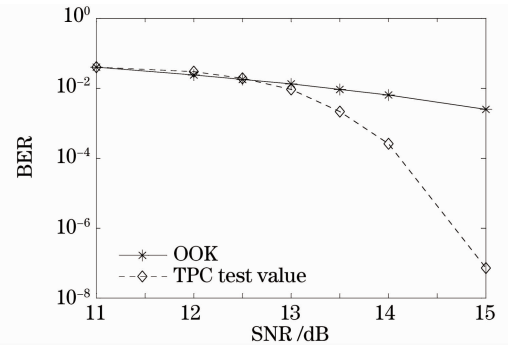


图 17 编码模块性能测试曲线

Fig. 17 BER performance of coding and modulation module