

# 可变基频激光通信数据传输系统研究与实现

钟 坤,何 宁,蒋红艳

(桂林电子科技大学信息与通信学院,广西 桂林 541004)

**摘 要:**针对无线光通信特点,提出一种基于基带跳频的激光数字通信方法,分析单基频调制与可变基频调制原理,研究激光跳频通信信号帧结构与 ASK 编解码方法,探讨利用 FPGA 进行跳频通信及控制的技术实现,并进行 FPGA 系统仿真和可变基频激光调制与传输实验。结果表明,采用可变基频的 ASK 调制编码通信能保证信息传输的安全性,在视距范围内实现了通信控制与字符数据传输,为大气激光通信应用提供一种新的技术途径。

**关键词:**激光通信;可变基频调制;FPGA;基带编码;通信控制

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.010

## Research and implementation of data transmission in laser communication system with variable fundamental frequency

ZHONG Kun, HE Ning, JIANG Hong-yan

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of wireless optical communication, a laser digital communication method based on baseband frequency hopping is proposed. The principles of single - fundamental and variable fundamental frequency modulation were analyzed. Frame structure of signals and implementation of ASK encoding and decoding in baseband frequency hopping laser communication were studied. Technical implementation of frequency hopping communication and control based on FPGA was discussed. In addition, the FPGA system was simulated and modulation and transmission experiments of variable fundamental frequency laser communication were carried out. The results show that the security of information transmission can be guaranteed by using variable fundamental frequency ASK modulation and encoding, and communication control and character data transmission in the visual range can be realized, which provides a new technical approach for the application of atmospheric laser communication.

**Key words:** laser communication; variable - fundamental frequency modulation; FPGA; baseband coding; communication control

### 1 引 言

无线光通信具有“无线”和“宽带”两大优势,其移动性和隐蔽性在军事和民用具有广阔应用前景<sup>[1-2]</sup>。利用大气信道进行信息通信,必须要解决数据信息的调制和传输问题,高效、可靠和抗干扰性能强的调制和编解码技术对提高系统性能及生存能

力起着至关重要的作用,如果数字基带频率是随机变化的,那么调制激光后的光发射周期也将随机变化,这样可大大提高传输信息被截获概率和安全性。本文提出一种基于基带跳频的激光数字通信方法,分析单基频调制与可变基频调制原理,研究激光跳频通信信号帧结构与 ASK 编解码方法,探讨利用

基金项目:国家自然科学基金(No. 61461014);广西高校科研基金(NO. KY2015YB098)资助。

作者简介:钟 坤(1989 -),男,硕士研究生,现主要从事光通信的研究。E-mail:; zskwan@163. com

收稿日期:2016-02-05

FPGA 进行跳频通信及控制的技术实现,有效解决信号传输安全性和可靠性,为激光通信系统应用提供参考依据。

### 2 数字基带通信原理与帧结构

对于数字基带信号,若表示各码元的波形相同而电平取值不同,则数字基带信号可表示为:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g(t - nT_s) \quad (1)$$

式中,  $a_n$  为第  $n$  个码元所对应的电平值(0, +1),且是一个随机量,即以概率  $P$  出现时为“1”,以概率  $1 - P$  出现时为“0”;  $T_s$  为码元持续时间;  $g(t)$  为某种脉冲波形<sup>[3]</sup>。

如果基带信号的码元周期  $T$  是一个变量且是关于伪随机序列的函数,那么基带信号频率将会在预先指定的频率上按照伪随机序列(PN 码)所规定的顺序离散跳变<sup>[4-5]</sup>,称之为数字基带跳频信号,可以表示为:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j g(t - jT(j, i)) \quad (2)$$

式中,  $a_j$  表示第  $j$  个码元所对应的电平值,与式(1)中的  $a_n$  相同;  $T(j, i)$  是关于  $j$  与  $i$  的伪随机序列函数。由式(2)可知,只需要两个独立的  $m$  序列就能实现频率与跳变时刻双随机变化的数字基带跳频信号<sup>[6-7]</sup>。

基带传输系统接收端的抽样判决位定时脉冲频率与发射端的码元频率一样,而对于基带跳频传输系统而言,接收端抽样判决位定时脉冲频率也必须是关于伪随机序列的函数,且与发射端基带频率跳变保持同步,因此,基带跳频传输系统采用同步通信方式。

同步通信的数据是连续发送的,即许多字符组成一个信息组,或称为信息帧,根据通信双方要求,每帧的开始与结束可设定不同的同步字符。当接收端接收并识别出帧起始字符后,就连续接收数据,直到接收到终止字符为止。图 1 所示为数字基带跳频通信的帧结构示意图。

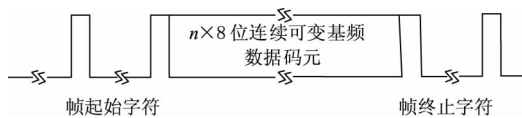


图 1 Frame structure of the digital baseband frequency hopping communication

图中起始和终止字符为 8 位,帧中码元周期、宽度由可变基频编码进行通信控制。

### 3 ASK 基带编码激光调制

无线激光通信普遍采用强度调制/直接检测(IM/DD)系统,其调制方式有开关键控调制(OOK)、脉冲位置调制(PPM)、数字脉冲间隔调制(DPIM)等<sup>[8]</sup>。

在 OOK 系统中,若采用每一比特间隔内信息脉冲的开或关来控制激光器发送,则 ASK 调制的已调信号可表示为:

$$e_{ASK}(t) = s(t)P(t) \quad (3)$$

其中,二进制基带信号  $s(t)$  是随机的单极性脉冲序列;  $P(t)$  表示激光功率。当  $s(t)$  发生变化时,  $P(t)$  受控而获得已调光信号。

若激光器输出由基带频率固定的单基频信号控制,则调制激光的重复频率固定不变。由式(1)与式(2)可知单基频调制的信号可表示为:

$$e_{ASK}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n P(t - nT_s) \quad (4)$$

如果调制信号的基带频率是可变的,则调制激光的重复频率发生变化,这种方式为可变基频调制<sup>[9]</sup>。综合式(2)与式(3)得可变基频调制信号为:

$$e_{ASK}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j P(t - jT(j, i)) \quad (5)$$

一般情况下脉冲激光器的驱动信号采用 TTL 电平控制,而二进制基带信号的电平为 TTL 形式,激光器发光速率受控于驱动脉冲,当调制单基频信号确定,则通过 ASK 调制后的脉冲光发射速率一定;如果驱动激光器的重频信号以一定规律变化,那么激光器就会按照变频速率发射激光,在激光通信接收端按照发射端对应规则进行采样解码,从而实现激光跳频通信。

### 4 激光跳频通信系统设计

#### 4.1 系统组成

可变基频激光通信数据传输系统包括 FPGA 平台、激光编码驱动、激光器、光学系统与光接收模块,系统框图如图 2 所示。

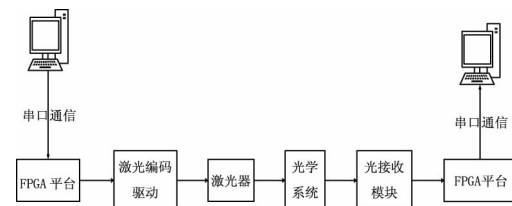


图 2 系统框图

Fig. 2 Block diagram of the system

发射端 FPGA 通过串口接收 PC 机的待发送数据,并将待发送的数据变成串行的基带频率随机变

化的信号,经过激光编码驱动加载到激光器,通过光学系统控制对准实现空间激光视距传输;接收端光接收模块将光信号转换成电信号,由 FPGA 对输入的基带频率随机变化的信号进行解码处理,最终通过串口送 PC 机上显示。

#### 4.2 硬件设计

硬件设计包括收发端 FPGA 硬件平台、激光器编码驱动和收端光接收电路,图 3 所示为系统硬件接口示意图。其中,发射端 FPGA 实现数字基带跳频信号产生与激光调制控制,接收端 FPGA 实现解跳频,激光器编码驱动是为了提高信号的带负载能力,光接收模块实现光电转换并对电信号进行放大整形处理。

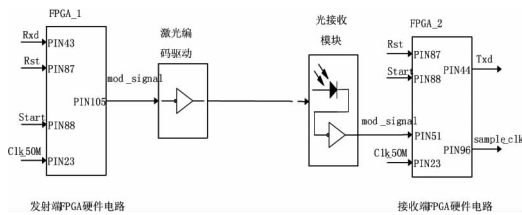


图 3 系统硬件接口示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hardware interfaces

图中 FPGA - 1 引脚 PIN23 为外部系统时钟输入端,引脚 PIN43 接收 PC 通信信息,引脚 PIN87、PIN88 分别是复位与通信控制端,引脚 PIN105 为可变基频 ASK 信号输出端;FPGA - 2 引脚 PIN51 为基频可变的信号输入端,引脚 PIN44 连接 PC 机通信端,引脚 PIN96 为采样脉冲输出监控端。

#### 4.3 软件设计

基于 FPGA 的设计模块是采用 Verilog HDL 语言来实现的。数字基带跳频系统由发射端数字基带跳频与接收端解跳频组成,图 4 为系统软件建模框图。

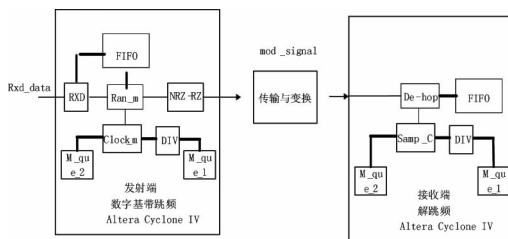


图 4 数字基带跳频系统软件模型框图

Fig. 4 The software block diagram of digital baseband frequency hopping system

图中发射端数据接收模块 Rxd\_data 将待发送的数据暂存在 FIFO 中;m 序列生成模块 M\_que\_1 与分频比查询模块 DIV 共同确定某时刻时钟的频率,M\_que\_2 确定跳变时刻;时钟模块 Clock\_m 根据

相应时钟控制参数产生对应的随机跳变的时钟信号 Hop\_clk;数字基带跳频控制模块 Ran\_m 在时钟 Hop\_clk 的作用下把待发送的并行数据转换成串行的基带跳频信号;码型变换模块 NRZ\_RZ 把基带跳频信号变成归零信号 mod\_signal。跳频信号产生程序流程图如图 5 所示。

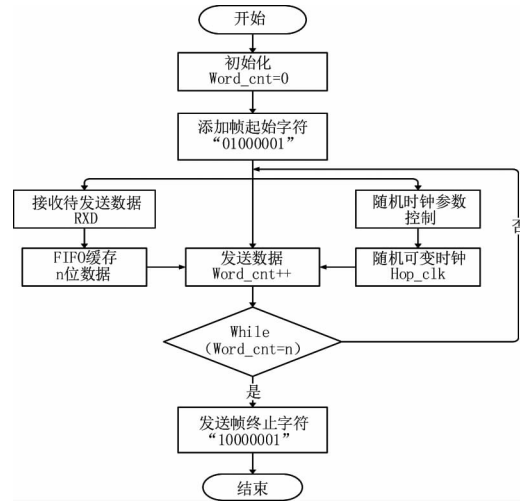


图 5 跳频信号产生程序流程图

Fig. 5 The program flow chart for generating frequency hopping signals

接收端模块 M\_que\_1、M\_que\_2 与模块 DIV 确定采样信号 Samp\_clk 的原理,同发射端对应模块确定时钟 Hop\_clk 的原理相同;采样时钟模块 Samp\_C 根据相应的时钟参数生成与输入信号相关的采样信号 Samp\_clk;同步解调控制模块 De\_hop 对输入信号进行同步提取,即在采样时钟 Samp\_clk 的作用下对输入信号进行抽样判决,识别帧结构,并将“串并转换”后的数据缓存到 FIFO 中等待后续处理。解跳频程序流程图如图 6 所示。

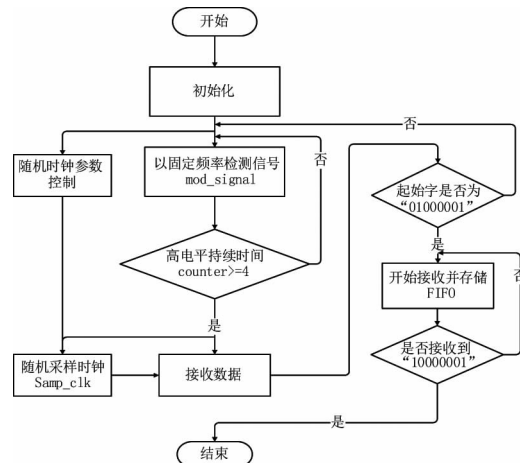


图 6 解跳频程序流程图

Fig. 6 The program flow chart for de-hopping

### 5 系统实验与分析

系统进行了软件仿真与硬件测试。软件仿真的

工作频率为 10 MHz,为了缩短仿真时间,数字基带跳频范围设定为 1000 ~ 1140 Hz。每个数据帧的起始、终止字符设定为“01000001”和“10000001”,连续的数据位由 32 组十六进制“0X5D”组成,每组信息所对应的二进制为“01011101”。仿真结果如图 7 所示。



图 7 数字基带跳频仿真

Fig. 7 The simulation of digital baseband frequency hopping

图中 hop\_clk 为“并串转换”触发脉冲,它将发送的数据转换成串行的数字基带跳频信号。hop\_clk 的频率及跳变时刻分别由两个 4 位 m 序列确定(如图中的 M\_number 和 m\_number),当 M\_number 为“0101”时,分频比 hop\_clk\_div 为 9600,对应的 hop\_clk 频率为 1041Hz;m\_number 决定 hop\_clk 跳变的时刻,即脉冲计数 hop\_clk\_counter 累加并等于 m\_number 的 2 倍时,hop\_clk 跳变一次,当 m\_number 等于“1000”且脉冲计数器等于 16 时,M\_number 由“1000”变成“0001”,分频比 hop\_clk\_div 从 9600 变成 9184,对应的 hop\_clk 从 1041Hz 变成 1088Hz。

为了使解调采样判决更加准确,采用 32 倍频采样脉冲,因此采样脉冲同步跳变的范围与发射端对应地设定为 32000 ~ 36480 Hz,仿真结果如图 8 所示。

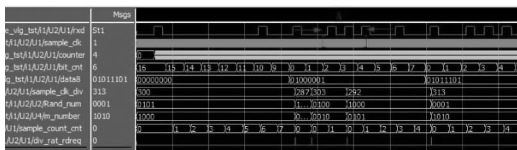


图 8 数字基带解跳频信号仿真

Fig. 8 The simulation of digital baseband de-hopping signals

图中 sample\_clk 为采样脉冲,当 rxd 没有信号输入时,sample\_clk 以固定的频率对 rxd 进行采样检测;当 rxd 有信号输入时,sample\_clk 的频率变成 32 倍频,开始接收数据并判断帧结构。如果接收到的数据不符合设定的帧结构形式,则继续检测输入信号。如图所示,当接收到第一个字符为“01000001”(帧起始字符)时,开始接收数据,接收到第二个字符为“01011101”,与发射端数据一致。

观察图 8 与图 7 可知,收发端对应的确定频率与跳变时刻的两个 m 序列输出始终保持一致,从而保证收发端的同步。

实验中硬件平台实验的脉冲激光波长为 1064 nm,脉宽 10 ns,输出脉冲能量为 50 mJ,基频可调范围(重频)选择 1 ~ 16 Hz,测试系统收发传输距离为 100 m,通过收发端光学调整后,进行字符数据传输。每帧的数据由 32 组十六进制“0XB3”组成,每组所对应的二进制为“10110011”。系统硬件平台实验测试波形如图 9 所示。

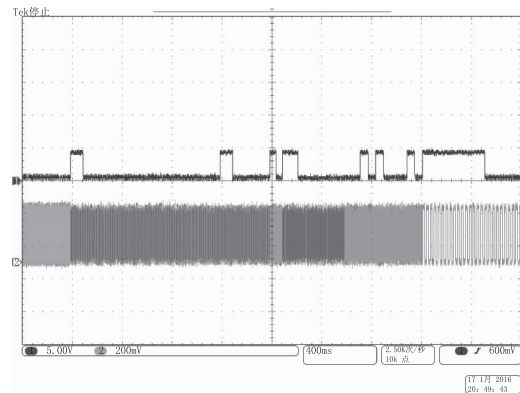


图 9 系统接收端测试波形

Fig. 9 The waveform tested at the receiver

图中序列 1 为数据信号,序列 2 为采样脉冲信号,两个信号保持 32 倍频关系,根据接收信号的码元周期可完成同步解调。帧起始字符为“01000001”,数据字符为“10110011”,正是发射端发送的数据。在数字基带跳频信号中的每一位归零码中都包含 32 个采样脉冲。通过图 9 与图 8、图 7 对比,硬件测试结果与软件仿真结果完全一致,验证了数字基带跳频与解跳频的技术方案是可行的。

## 6 结 论

为满足信息通信安全与可靠性需求,结合 FPGA 和无线光通信技术,提出数字基带跳频的激光通信方法,分析单基频调制和可变基频调制技术原理,通过软件仿真与硬件测试,系统实现了数字基带跳频信号激光传输,实验结果表明,采用 FPGA 完成可变基频编码与激光调制,在视距范围内实现了通信控制与字符数据传输,提高了通信的安全性与有效性,为大气激光通信提供一种新的技术途径。

## 参考文献:

[1] SU Lei. Wireless optical communication and its application [J]. Optical Communication Technology, 2002, 26 (4): 22 - 25. (in Chinese)  
 苏磊. 无线光通信技术及其应用 [J]. 光通信技术, 2002, 26(4): 22 - 25.  
 [2] Nei J Vallesterio, Mark Khusid, Narasimha S Prasad, et al.

- Free-space optical communication systems (FOCUS): an army overview [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4821: 276 - 282.
- [3] FAN Changxin, CAO Lina. Principle of communication [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 133 - 134. (in Chinese)  
樊昌信, 曹丽娜. 通信原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 133 - 134.
- [4] ZHU Ninghua, CHEN Wei. A band new security mechanism of fibre communication — light hopping communication [J]. Journal of Network New Media, 2012, 1 (6): 70 - 72. (in Chinese)  
祝宁华, 陈伟, 刘建国. 一种全新的光通信保密机制——光跳频 [J]. 网络新媒体技术, 2012, 1 (6): 70 - 72.
- [5] SUI Yangqing, CHEN Jiafu. Frequency-hopping communication technology research and simulation [J]. Microprocessors, 2012, 3: 24 - 28. (in Chinese)  
眭杨青, 陈家富. 跳频通信技术研究及仿真 [J]. 微机处理, 2012, 3: 24 - 28.
- [6] WANG Huihua, LI Baoping. Design and realize of m sequence generator [J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2007, 15 (2): 58 - 61. (in Chinese)  
王会华, 李宝平. m 序列发生器的设计与实现 [J]. 北京电子科技学院报, 2007, 15 (2): 58 - 61.
- [7] JIANG Quan, YAO Zhendong, LI Jian. Design of an m sequence signal generation based on FPGA [J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22 (7): 155 - 157. (in Chinese)  
蒋权, 姚振东, 李建. 基于 FPGA 的 m 序列信号发生器设计 [J]. 电子设计工程, 2014, 22 (7): 155 - 157.
- [8] WU Xingyu. Research on optical modulation and demodulation techniques in space optical communication [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007: 16 - 18. (in Chinese)  
吴星煜. 空间激光通信系统中的调制与解调技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 16 - 18.
- [9] HUANG Linglu, HE Ning, FENG Taiqin, et al. Research on underwater acoustic communication of laser acoustic downlink through air-sea transmission channel [J]. Laser & Infrared, 2014, 44 (9): 972 - 976. (in Chinese)  
黄灵鹭, 何宁, 冯太琴, 等. 海气信道下激光致声下行水声通信系统探讨 [J]. 激光与红外, 2014, 44 (9): 972 - 976.