

## 时间控制脉冲间隔激光编码方法研究

苗锡奎<sup>1,2</sup>, 赵威<sup>1,2</sup>, 张恒伟<sup>1,2</sup>, 杨伟宏<sup>1,2</sup>

(1. 中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003;

2. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 激光编码是激光半主动制导武器抵抗激光诱偏干扰的重要措施, 现有激光编码具有一定的规律性, 很容易被干扰系统所识别破解, 而使激光半主动制导武器受到威胁。为此, 提出了一种基于绝对精确时间控制的激光脉冲激光编码方法。首先利用北斗授时系统对激光编码端授时, 以此得到精确时刻, 以绝对精确整秒时刻为参数, 根据编码基频大小, 按照编码函数一次产生当前时刻所需数量的脉冲时间间隔; 然后在后续时刻利用定时器在预产生的时间间隔处产生脉冲信号, 并控制脉冲宽度; 最后对该编码方法的有效性进行了仿真实验和实际实验验证。实验结果表明, 授时精度 20 ns, 脉冲编码精度优于 30 ns。该编码最大的特点是各编码脉冲时间间隔各不相同, 无任何规律和周期, 是一种准随机分布编码, 而且编码函数运算量小, 易于实现, 具有较强的抗解码能力。

**关键词:** 时间控制脉冲间隔; 脉冲编码; 北斗授时同步; 绝对精确时间; 激光半主动制导

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1006002

## Research of laser encoding method based on time-controlled pulse interval

Miao Xikui<sup>1,2</sup>, Zhao Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Hengwei<sup>1,2</sup>, Yang Weihong<sup>1,2</sup>

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China;

2. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Laser pulse encoding of laser semi-active guided weapon is an important measure to resist the laser decoy jamming. To a certain extent, existing laser pulse encoding methods have regularity, are identified and cracked by jamming system easily, making laser semi-active guided weapons threatened. A time-controlled laser pulse interval encoding method was proposed. First the encoder was timed by BeiDou module to get absolutely precise time, taking the precision moment (hour, minute, second) as parameters, according to the encoding base frequency, time intervals of the pulses required were generated at the current precision moment by the encoding function only once. Then in the subsequent precision moment, pulse signals with pulse width adjusted were generated at time interval using the timer. Finally, the effectiveness and superiority of the method were verified by numerical simulation and real experiments. Experimental results indicate that timing accuracy is 20 ns, and pulse encoding accuracy is less than 30 ns. The method is characterized by various time intervals of pulses, without any regularity and period, small

收稿日期: 2016-02-11; 修订日期: 2016-03-20

基金项目: 总装预研项目(51303020203-3)

作者简介: 苗锡奎(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要从事光电及光电对抗、计算机视觉、图像处理方面的研究。Email: miaoxikui@163.com

calculating amount of the encoding function, easy to implement, and strong anti-decoding capability.

**Key words:** laser pulse encoding; time-controlled pulse interval; timing and synchronization; absolutely precise time; laser semi-active guidance

## 0 引言

激光半主动制导武器以其精度高、成本低、战术运用灵活等优点,受到军事大国的重视<sup>[1]</sup>,是目前装备量最大、应用范围最广的一类精确打击武器,其核心为激光半主动制导系统<sup>[2-3]</sup>。该系统通常由导弹上激光半主动导引头和导弹外的激光目标指示器构成。目标指示器向目标发射激光半主动制导编码信号,激光导引头接收目标漫反射回来的编码信号来解算目标方位,进而引导制导武器对目标进行攻击。

激光半主动制导系统中对激光脉冲编码目的是解决在同一战场中多个激光目标指示器发射的激光信号相互干扰的问题<sup>[4]</sup>,激光指示信号编码后,可使多枚激光半主动制导武器同时攻击不同目标而不引起混乱;更重要的是通过激光指示信号编码,可有效抵抗来自敌方的激光有源干扰,如激光诱偏干扰<sup>[5-6]</sup>。

激光诱偏干扰是对抗激光半主动制导武器最常用的干扰手段,在被保护目标附近布置激光诱偏干扰系统对来袭激光编码指示信号进行识别解码,然后由干扰机按照来袭激光编码指示信号的规律超前转发干扰激光脉冲信号至假目标上,诱骗激光制导武器攻击假目标<sup>[7]</sup>。激光诱偏干扰的核心技术是对激光编码指示信号码型的快速识别破解,一旦敌方有能力识别破解己方的激光编码指示信号,那么就一定能够引偏我方所发射的激光半主动制导武器,对激光半主动制导武器的战场生存能力构成严峻威胁。

目前,激光指示信号所采用的编码方式已日趋多样化,但从公开报道的文献中可以发现,普遍采用的激光编码主要有<sup>[8-9]</sup>:精确频率码、变间隔码、脉冲调制码(PCM)、有限位随机周期码、等差序列码和位数较低的伪随机码等,前 4 种属于周期型编码,可将其归为一类。因此,编码形式主要可以分为三类:周期型、等差型、伪随机型。这些码型的最大特点是编码具有一定的规律性,诱偏干扰系统一般在 1~2 s 内都可以识别破解。

参考文献[10]在 DSP 系统上构建了激光脉冲编

码控制器,实现了精确编码、变间隔编码和变脉冲编码等高精度脉冲编码算法,该编码控制器仍然是对传统的几种激光脉冲编码的实现,只是在脉冲精度和同步精度上有所提升;参考文献[11]提出了一种基于脉冲调制与脉冲宽度调制混合的新型编码方法,编码复杂,给解码带来负担,脉冲宽度调制的激光回波极容易受到大气传输的影响,故这种编码的稳定性差;参考文献[12]基于分组/分队思想,提出了一种新的激光编码方法,编码中的队头部分具有一定的周期性,使得队头容易受到干扰,而错过对队头和队尾脉冲的接收;参考文献[13]在参考文献[12]中激光编码方案的基础上,提出了一种三波长激光编码方案,可抵抗激光高重频干扰;参考文献[14]提出了一种基于 Walsh 矩阵的多目标指示激光束编码方案,使用 Walsh 矩阵的不同行对激光束进行编码,该编码激光脉冲信号时间相关性强,容易被自相关解码算法所识码。

针对当前传统激光脉冲编码容易被识别破解的问题,文中提出一种新型激光脉冲编码方法,称之为时间控制脉冲间隔编码。通过高精度北斗授时模块对编码系统授时;根据编码基频要求,以每一精确整秒时刻为控制参数,按照编码函数控制产生当前时刻所需数量的脉冲时间间隔;利用高精度定时器在时间间隔处产生编码脉冲信号,实现对脉冲的编码。仿真和实际实验表明:文中提出的激光脉冲编码无固定重复频率和周期性,是一种准随机分布编码,己方容易解码,敌方难以解码,具有较强的抗有源欺骗干扰能力。

## 1 授时同步

该方法利用北斗授时模块对编码系统授时,通过北斗授时模块可以获得很多有用的信息。文中的编码方法所使用的信息有:最简导航传输数据 RMC (包含绝对时刻)和秒脉冲信号。

### 1.1 授时同步绝对时间获取

利用北斗授时系统,激光半主动制导中的编码端可以获取最简导航传输数据 RMC,在最简导航传

输数据 RMC 中提取绝对时刻,对编码端授时,授时后以绝对时刻为控制变量,利用编码函数产生激光脉冲编码所用的脉冲时间间隔。

对北斗授时系统传出的最简导航传输数据 RMC 进行截取,可以得到绝对时刻。北斗授时系统采用 NMEA0183 协议,下传最简导航传输数据 RMC 格式为:\$RMC,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,<8>,<9>,<10>,<11>,<12>\*hh CR LF。

该数据帧中包含了绝对时刻、定位状态、经度、纬度、地面速度等信息,其中<1>表示绝对时刻,格式为 hhmmss.ss(时分秒.毫秒),关于最简导航传输数据 RMC 信息含义见参考文献[15]。

最简导航传输数据 RMC 具体实例如下所示:

```
$RMC,110 203.32,A,3 962.341 49,N,117 10.550 11,E,, 050433,12,04,7*22。
```

110 203.32 就是绝对时刻,取绝对时刻中的时、分、秒作为绝对精确时刻,110 203(时分秒),将整秒时刻作为编码端编码函数的控制参量。

### 1.2 编码端授时同步

北斗授时系统稳定定位后,利用 1 PPS 信号输出接口,在每一精确整秒时刻会发送一个秒脉冲信号,与此同时,北斗授时系统通过串口向外发送最简导航传输数据 RMC。利用串口发送的最简导航传输数据 RMC 传输具有一定的时延,相对来讲,秒脉冲信号时延可以忽略不计。因此,利用最简导航传输数据 RMC 中的绝对时刻无法使激光半主动制导中的编码端与解码端同步,这将会导致同步误差较大。

最简导航传输数据 RMC 数据帧利用串口传输,时延为毫秒量级。因此文中利用接收的秒脉冲信号,并结合绝对时刻来对激光半主动制导中的编码端与解码端进行授时同步。

为使激光半主动制导中的编码端与解码端严格同步,文中在第一个秒脉冲获取后,从最简导航传输数据 RMC 中解析出绝对时刻,在下一秒脉冲处授时同步,后续授时同步将不再使用具有延时特性的最简导航传输数据 RMC,仅使用秒脉冲信号和高精度整秒定时器就可以完成解码端与编码端的同步。

## 2 编码端激光脉冲编码

对北斗授时系统下传的最简导航传输数据 RMC 解析获取绝对时刻,将该绝对时刻作为激光脉

冲编码函数的控制参量,控制激光脉冲产生的时间间隔(也是脉冲产生的时刻序列)。

### 2.1 激光脉冲编码函数

编码函数是时间控制脉冲间隔激光编码的核心,以精确整秒时刻为控制参量,利用编码函数生成每一时刻所需数量的脉冲时间间隔(脉冲产生时刻)。为使激光脉冲编码信号对己方容易识别,对敌方难于识别,或不能识别,此节以绝对精确时刻为参数设计了编码函数用于产生脉冲时间间隔。

取绝对时刻中的时分秒,组成<hhmmss>格式的信息,作为绝对精确时刻,如 19 时 02 分 03 秒组成绝对精确时刻<110203>。以激光脉冲编码基频 10Hz(脉冲间隔平均值约为 100 ms)为例,介绍编码函数,产生脉冲时间间隔。由于基频是 10 Hz,所以每一精确整秒时刻需要产生 10 个脉冲间隔,编码函数算法的伪代码如下所示。当基频为其他频率时,修改相应参数即可。

算法:编码函数算法

输入:绝对精确整秒时刻<hhmmss>

输出:10 个脉冲时间间隔 pulse\_interval\_per\_sec[]

解析 RMC 得到绝对精确整秒时刻<hhmmss>;

```
1 pulse_interval_per_sec[] = coder_function(hhmmss)
```

```
2 {
```

```
3 G = get_rand ()//随机数生成器
```

```
4 set_random(G , hhmmss)
```

```
/* 将绝对精确整秒时刻作为随机数产生器秘钥种子.*/
```

```
5 rand_temp[0:9] = G.get_pulse_interval (10);
```

```
//产生 10 个范围是-5 000 μs~+5 000 μs 的随机数.
```

```
6 pulse_interval_second[0:9]=100 000+ rand_temp[0:9];
```

```
//产生 10 个范围是 95 000 μs~+105 000 μs 的随机数.
```

```
7 }
```

通过该编码函数就可在每一绝对精确时刻处产生脉冲时间间隔。编码函数中的随机函数产生器 G 及产生指定元素个数的随机数函数 get\_pulse\_interval () 的实现方法可以参考 matlab 或 C++库中相应的随机数产生方法来编写。

现以基频 10 Hz,绝对精确时刻<090107>为例,仿真共产生 10 s(100 个)编码脉冲时间间隔,如图 1 所示。

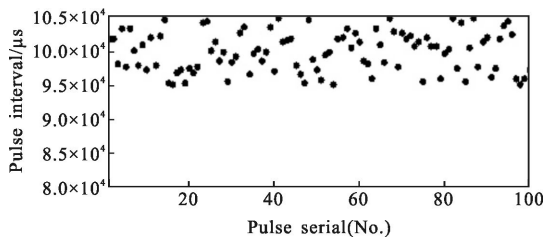


图 1 090107 处 100 个脉冲时间间隔  
Fig.1 100 pulses intervals at time 090107

从图 1 可以看出, 各个脉冲的时间间隔都不相同, 没有周期和规律, 是一种随机分布的编码样式。正是这种编码的优点, 使这种编码具有很强的抗解码能力, 敌方不能识别破解, 但我方解码系统只要授时同步后, 具有与编码系统相同的编码函数, 在脉冲间隔处设置脉冲录取波门就可很容易识码。

2.2 激光脉冲编码

编码系统在授时同步后, 同时启动 1PPS 秒脉冲计数器模块和定时器模块。由于最简导航传输数据 RMC 输出存在串口时延, 因此, 在北斗授时稳定后, 编码端获取第一个秒脉冲信号后, 通过高精度整秒定时器对秒脉冲整秒定时, 随后解析最简导航传输数据 RMC 中的绝对时刻, 编码端就可以计算出后续接收到的每一个秒脉冲到来的整秒时刻。后续授时同步将不再使用具有时延特性的最简导航传输数据 RMC。

在第一个秒脉冲同步后, 随即从最简导航传输数据 RMC 中获取绝对精确整秒, 以整秒时刻为控制参量, 使用编码函数产生激光脉冲时间间隔(脉冲生成时间序列)。在接收到第二个秒脉冲时, 设置高精度定时器, 将脉冲时间间隔作为定时器定时时间, 启动定时器, 定时到达后, 生成脉冲信号。同时, 将下一个脉冲时间间隔重新装入高精度定时器并继续定时, 当定时到达后, 生成编码脉冲信号。然后重复定时、生成编码脉冲信号, 直到接收到下一秒脉冲信号后重复上一秒操作。

现以基频 10 Hz 为例, 生成 100 s, 共计 1 000 个脉冲时间间隔, 介绍时间控制脉冲间隔激光编码算法, 其伪代码如下所示。

算法: 时间控制脉冲间隔激光编码算法  
输入: 1PPS 秒脉冲、绝对精确时刻  $t$   
输出: 脉冲间隔(脉冲产生时刻)集合 pulse\_interval[]  
解析 RMC 获取  $t<hhmmss>$  和秒脉冲信号;

```

初始化: index i=0; j=0;
1 if (秒脉冲 第一次到来)
2 {
3 abs_prec_time[i]=t<hhmmss>;/* 获取 t<hhmmss>*/
4 for j=0:99
5 {
6 pulse_interval[10*i : 10*i+9]=
   coder_function(abs_prec_time [i]) ;
7 i++; j++; /* 索引自增 */
8 abs_prec_time [i]=t+ i; /* 更新绝对时间 */
9 }
10 }
    
```

相应的时间控制脉冲间隔激光脉冲控制算法的伪代码如下所示。

算法: 时间控制脉冲间隔激光脉冲控制算法  
输入: 秒脉冲、绝对精确时刻<hhmmss>、脉冲间隔(脉冲产生时刻)集合 pulse\_interval[]

输出: 激光脉冲  
解析 RMC 获取 t<hhmmss>和秒脉冲信号;

```

初始化: index i=0; j=0;
1 if (秒脉冲第二次以后到来 )
2 {
3 for i=0:99
4 {
5 for j=0:9
6 {
7 pulse_interval_timer =
   pulse_interval[10*i+j];
8 Set pulse_interval_timer Run ;
9 if (pulse_interval_timer Done )
10 {
11 do laser pulse; //发射宽度可调激光脉冲
12 j++;
13 }
14 }
15 i++;
16 }
17 }
    
```

对文中所提出的时间控制脉冲间隔激光编码的解码, 与传统激光脉冲编码解码方法有很大区别, 传统激光编码解码端需要事先接收若干个激光编码脉

冲,统计识别出编码端的编码规律,进而解码。文中的编码识别时,解码系统只需利用秒脉冲信号和绝对精确时刻来与编码系统同步后,以绝对精确整秒时刻为控制参数,使用与编码系统相同的编码函数产生脉冲接收时刻,利用脉冲接收时刻精确控制脉冲录取波门的时间位置即可解码。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 仿真实验与结果

为验证文中提出的时间控制脉冲间隔编码方法的有效性,仿真验证了该编码方法。首先,建立了基于 ModelSim 系统的仿真实验验证系统,对功能和时序进行了仿真验证,仿真中采用程序输入的方式提供绝对精确时刻。

首先基于 ISE14.4 开发环境,利用 Verilog 语言编写了时间控制脉冲间隔编码所使用的算法模块,主要包括:绝对精确时刻产生模块、时钟源模块、时间控制脉冲间隔编码函数、脉冲间隔生成模块、脉冲输出控制模块等。FPGA 晶振频率 200 MHz、通过锁相环(PLL)模块将晶振频率倍频为 400 MHz,作为脉冲间隔高精度定时器时钟,目标器件设置为 Xilinx V5 XC5VSX95T。功能仿真和时序仿真都验证了文中方法的可行性及有效性。

为便于观察,如图 2 所示仅画出了仿真实验产生的基频为 10 Hz,2 s 内 20 个脉冲时间间隔的示意图。图中的横坐标表示编码脉冲精确时刻,纵坐标为编码脉冲的幅值(单位伏特),仿真中电平标准为 TTL,脉冲间隔各不相同。由于脉冲间隔是利用定时器方法定时产生,故脉冲间隔精度与定时器的定时精度有直接关系,仿真中定时器最小时间分辨率为 2.5 ns,故仿真中时间控制脉冲间隔编码精度为 2.5 ns。

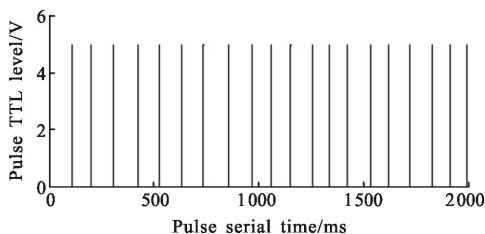


图 2 20 个脉冲时间间隔

Fig.2 Time interval of 20 pulses in simulation

仿真实验中编码精度使用编码算法产生的时间

间隔与仿真验证系统实时输出的脉冲时间间隔之差表示。经统计,仿真精度误差小于 2.5 ns,脉冲时间间隔错误率小于 0.05%。

为定量评估 Xilinx FPGA 电路延时,使用综合后的网表文件评估电路延时,经仿真,基于 Xilinx V5 XC5VSX95T 构建的仿真验证系统电路平均延时小于 4 ns。因此,仿真中的时间控制脉冲间隔编码误差小于 7 ns(定时器精度 2.5 ns+电路延时 4 ns)。

#### 3.2 实际实验与结果

为了验证文中算法的有效性和可行性,基于 Xilinx V5 XC5VSX95T 研制了时间控制脉冲间隔激光编码器,对文中算法进行了验证。Xilinx V5 XC5VSX95T 开发系统使用 200 MHz 晶振,用锁相环(PLL 模块)倍频后作为脉冲时间间隔定时器的时钟,精度 2.5 ns;北斗授时系统使用某型号授时接收机。该授时模块工作稳定、可靠性高、定位时间短、秒脉冲信号与 RMC 数据帧分离。

时间控制脉冲间隔编码器由授时模块、通信模块、逻辑控制模块、激光编码算法和信号驱动模块组成,除授时模块外,其余模块均采用 FPGA 实现,各模块结构如图 3 所示。

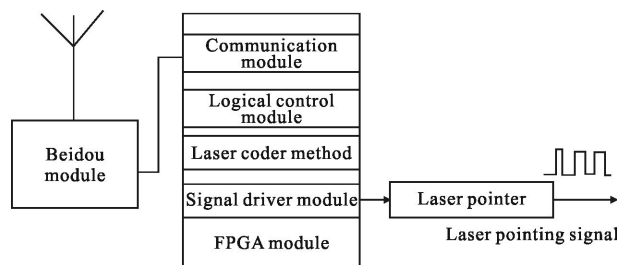


图 3 编码器各模块结构图

Fig.3 Modules structure of the coder

如图 4 为时间控制脉冲间隔激光编码器的具体硬件实物图,激光编码脉冲信号为 LVTTTL 电平信号。

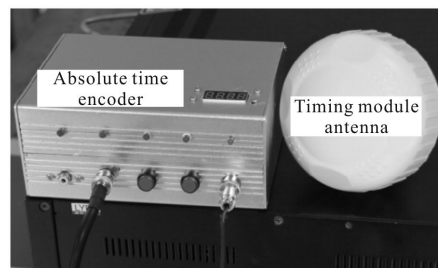


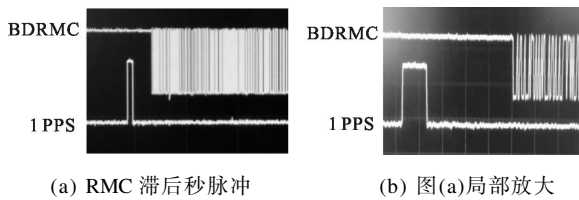
图 4 时间控制脉冲间隔激光编码器实物图

Fig.4 Coder based on time control pulse interval

3.2.1 RMC 数据帧传输延时实验

为验证 RMC 数据帧接收滞后于秒脉冲, RMC 数据帧不能作为收发分体系统的同步信号, 只能使用秒脉冲信号和整秒精确定时器, 并结合第一次从 RMC 数据帧中解析的绝对精确时间来确定每次秒脉冲到来时的精确时刻, 以完成同步。

将秒脉冲端口与 RMC 数据帧端口接入示波器, 调整示波器采集参数, 查看两信号时序, 串口波特率设置为 115 200 bps。图 5 所示为 RMC 数据帧滞后于秒脉冲的实测图, 图 5(b) 是图 5(a) 局部高频采样图。从图 5(b) 中可以读出 RMC 数据传输滞后与秒脉冲约 4.7 ms。图 5(b) 中横轴为 1 ms/格。



(a) RMC signal lags 1 PPS signal (b) Local amplification of (a)

图 5 RMC 数据信号

Fig.5 RMC data lags 1 PPS signal

3.2.2 编码脉冲时间间隔产生所用时间统计实验

按照 2.2 节脉冲编码要求, 在第一个 1 PPS 秒脉冲到达时, 获取绝对精确时刻后, 要在第二个秒脉冲到达前(间隔 1 s), 将后续各整秒时刻处的编码脉冲时间间隔按照编码函数都预先计算出来。为此需要统计一定时长编码脉冲时间间隔产生所消耗时间。

如图 6 所示为编码函数在 10 处精确时刻运行 1 000 次的平均耗时图, 编码函数在每一精确时刻处运行平均耗时 74.35  $\mu$ s, 编码基频 10 Hz。

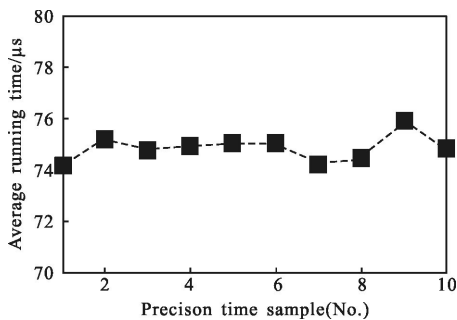


图 6 编码函数运行平均耗时

Fig.6 Consume time of code function

以编码基频 10 Hz、编码时长分别设置为 30 s、

40 s、50 s、200 s、300 s、400 s、600 s、800 s、1 000 s、1 200 s, 统计编码脉冲时间间隔产生所用的时间。随着编码时长的增加, FPGA 系统所用寄存器、逻辑阵列块、RAM 块逻辑单元等硬件资源也随之增加, 产生脉冲时间间隔耗时呈指数递增。为便于在坐标系统显示, 将各编码时长所对应的脉冲时间间隔耗时 code\_pulse\_time 取以 10 为底的对数进行统计, 如公式(1)所示:

$$\text{code\_pulse\_time\_log} = \log_{10}(\text{code\_pulse\_time}) \quad (1)$$

图 7 为各编码时长下产生编码脉冲时间间隔的耗时图。当编码时长为 1 200 s(20 min)时, 耗时为 282 904  $\mu$ s(282.904 ms), 小于 1 s, 能够在第二个秒脉冲到来前产生所有的脉冲时间间隔。

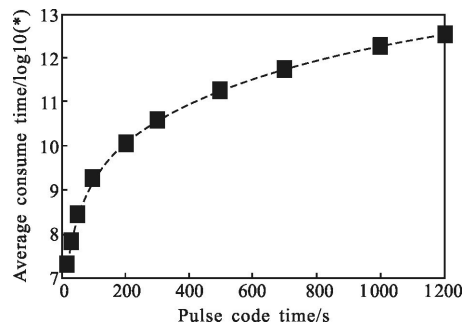


图 7 编码时间下产生脉冲时间间隔耗时图

Fig.7 Consume time of pulse interval versus pulse code time

3.2.3 时间控制脉冲间隔激光编码实验实验

使用示波器(LeCroy 公司数字存储示波器, 带宽 3 GHz, 上升时间 150 ps, 最大采样率 20 GB/s)采集编码器输出的基频为 10 Hz 的脉冲编码信号, 为了便于显示, 这里将示波器接到 22.5 in(1 in=2.54 cm) LCD 显示器上, 对脉冲进行显示, 图 8 所示为时间控制脉冲间隔编码模块产生的 10 个脉冲间隔, 横轴为时间轴, 100 ms/格, 纵轴为脉冲电压幅值, 1 V/格。图 9 所示为编码模块产生的 20 个脉冲间隔, 横轴为 200 ms/格。

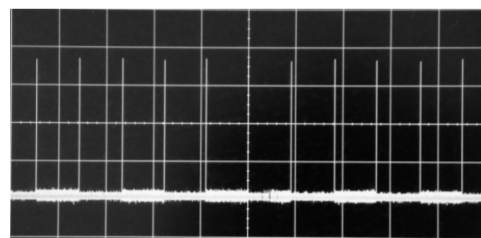


图 8 10 个脉冲时间间隔

Fig.8 Time interval of 10 pulses in real experiment

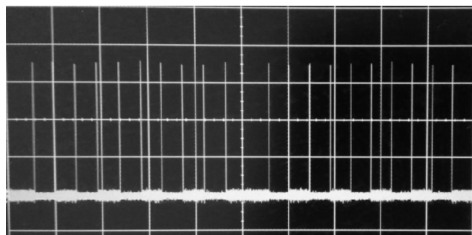


图 9 20 个脉冲时间间隔

Fig.9 Time interval of 20 pulses in real experiment

如图 10 所示为截取了编码器部分运行时间的脉冲输出间隔(约 21 s,基频 10Hz),时间从 10h 14min 57 s 812  $\mu$ s 到 10 h 15 min18 s 468  $\mu$ s。从图中可看出:该编码方法的脉冲时间间隔各不相同,而且没有任何规律和周期,具有准随机分布特点。

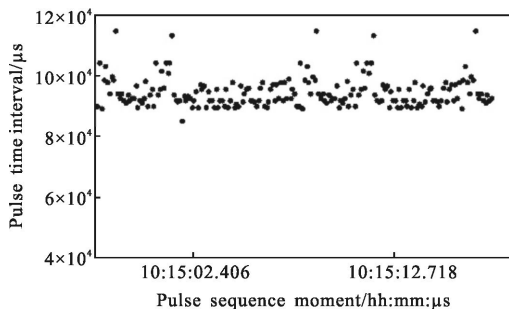


图 10 编码时间为 21 s 的脉冲时间间隔

Fig.10 Pulse time interval of 21 s encoding time

利用示波器所采集的脉冲时间间隔与编码模块预产生的时间间隔做差,两者之差作为脉冲编码误差。对 20 000 个时间间隔进行统计,脉冲编码误差最大值为 35.4 ns,最小值为 25.2 ns,平均脉冲编码误差为 29.4 ns。

### 3.3 误差分析与提高编码精度策略

根据编码器各模块组成原理及实验分析,影响时间控制脉冲间隔激光编码精度的主要因素有以下 4 种。

- (1) 授时精度误差:1 PPS 信号输出精度和稳定精度都影响编码的精度;
- (2) 脉冲间隔定时器误差:脉冲间隔定时器误差直接影响脉冲编码精度;
- (3) FPGA 器件延时:FPGA 逻辑门延时和走线延时都会对编码精度造成影响;
- (4) 电路芯片中等效电容:集成电路中芯片的等效电容(势垒电容和扩散电容)及高频电子线路上的

串扰和毛刺等会对编码精度造成影响。

针对上述影响脉冲编码精度的因素,可以从以下 4 个方面来提高脉冲编码精度。

- (1) 提高授时模块的授时精度:对编码器优化升级,采用更高精度的北斗授时模块;
- (2) 提高时间间隔定时器精度:进一步加强硬件编程与仿真建模的结合,在仿真基础上,不影响编码时序情况下,确定定时器时钟源最大/最佳频率;
- (3) 优化 FPGA 资源和走线布局:合理优化 FPGA 资源与走线布局,减小逻辑门和走线延时;
- (4) 对编码器集成电路中的等效电容做补偿,并采取串扰与毛刺剔除手段:找出影响高频脉冲信号的关键器件,对其所产生的等效电容建模,并采取一定补偿措施。

## 4 结 论

随着激光诱偏干扰技术的不断发展和完善,激光半主动制导系统中常规的激光脉冲编码容易被诱偏干扰系统识别破解,无法保证激光半主动制导武器的抗干扰性。为此,文中提出一种时间控制脉冲间隔激光脉冲编码方法,以授时同步的精确整秒时刻为参数,控制激光脉冲产生的时间间隔,利用时间间隔定时器,在时间间隔处产生脉冲信号实现激光脉冲编码。实验结果表明:脉冲编码精度优于 30 ns,且编码无任何周期和规律,是一种准随机分布码,具有很强的抗解码能力,己方识别容易,敌方无法识别破解。

文中还对影响编码精度的因素进行了分析,指出了四类因素是影响编码精度的主要因素,接下来的工作将侧重于进一步提高编码精度、优化升级编码器以及针对该编码方法设计相应的解码算法,并搭建编码/解码技术验证系统对该编码技术进行完整性验证。

### 参考文献:

[1] Liu Feng, Ying Jiaju, Liu Mingming. An analysis on set-forward of laser guide active jamming [C]//SPIE, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Communication Technologies and Systems, 2013, 8906: 10.1117/12.2033636.

[2] O'Daniel Jason K, Preston Young, Eric Golden, et al. Power, pulse width, and repetition rate agile low-cost multi-spectral

- semi-active laser simulator [C]//SPIE, Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing XV, 2010, 77630: 10.1117/12.866201.
- [3] Zheng Xingyuan, Zhang Haiyang, Wang Yunping, et al. Research for the jamming mechanism of high-frequency laser to the laser seeker [C]//SPIE, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Communication Technologies and Systems, 2013, 8906: 10.1117/12.2035030.
- [4] Wang Jiang, Lin Wei, Wang Peng, et al. Analysis of laser energy chain in the hardware-in-the-loop simulation system of semi-active laser guide [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1230–1233. (in Chinese)  
王江, 林蔚, 王鹏, 等. 激光半主动制导武器半实物仿真系统能量链研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1230–1233.
- [5] Wang Yunping, Zhao Changming, Li Yan, et al. Hardware-in-the-loop simulation system for laser-angle-deception jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1217–1222. (in Chinese)  
王云萍, 赵长明, 李岩, 等. 激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1217–1222.
- [6] Fan Shipeng, Lin Defu, Wang Jinran, et al. Error analysis and correction for hardware-in-the-loop simulation system of laser guidance weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 904–908. (in Chinese)  
范世鹏, 林德福, 王靳然, 等. 激光制导武器半实物仿真的误差分析与校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 904–908.
- [7] Li Shuanggang, Nie Jinsong, Li Hua, et al. Assessment of effectiveness on angle deceptive jamming to semi-active laser-guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 41–45. (in Chinese)  
李双刚, 聂劲松, 李化, 等. 对激光半主动制导武器的角度欺骗干扰的效能评估 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 41–45.
- [8] Wang Yunping, Zhang Haiyang, Zheng Xingyuan, et al. The experimental research of the jamming effect of high-repetition-laser for laser seeker [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(8): 858–863. (in Chinese)  
王云萍, 张海洋, 郑星元, 等. 高重频激光对激光导引头的干扰机理实验研究 [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(8): 858–863.
- [9] Fang Yanchao, Guo Lihong, Li Yan, et al. Jamming effectiveness analysis of the weather vane-type laser-guided bombs by laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(5): 656–664. (in Chinese)  
方艳超, 郭立红, 李岩, 等. 激光对风标式激光制导炸弹干扰效能分析[J]. 发光学报, 2013, 34(5): 656–664.
- [10] Liu Tingxia, Wang Weiguo. Realization of new high precision coding for laser pulse [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28 (4): 402–408. (in Chinese)  
刘廷霞, 王伟国. 新型高精度激光脉冲编码的实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(4): 402–408.
- [11] Wei Wenjian, Qin Shiqiao, Zhan Dejun, et al. Research on laser encoding in laser semi-active homing guidance[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1199–1203. (in Chinese)  
魏文俭, 秦石乔, 占德军, 等. 激光半主动寻的制导激光编码的研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1199–1203.
- [12] Fang Yanyan, Chai jinhua. New kind scheme of laser code in the terminal guidance ammunition round [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 534–539. (in Chinese)  
方艳艳, 柴金华. 激光末制导炮弹武器系统新型激光编码方案[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 534–539.
- [13] Chai Jinhua, Liu Zhibo, Zhu Yiwang, et al. Scheme of three-wavelength laser code in the laser terminal guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 396–399. (in Chinese)  
柴金华, 柳志波, 朱一旺, 等. 激光末端制导三波长激光编码方案[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 396–399.
- [14] Cheng Yubao, Sun Zhongtao. Walsh coding of laser beam for multi-target pointing [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(11): 88–91. (in Chinese)  
程玉宝, 孙中涛. 多目标指示激光束的 Walsh 编码研究[J]. 电光与控制, 2008, 15(11): 88–91.
- [15] He Haiying, Gong Guanglin, Tian Xiaoping. Design and implementation of a timing and control system based on satellite timing[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2013, 32(6): 512–517. (in Chinese)  
何海英, 龚光林, 田小平. 基于卫星授时控制器的设计与实现[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(6): 512–517.