

# 基于单光子探测的不同重频下扩展伪随机编码规则

陈雨<sup>1,2</sup>, 羊毅<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

<sup>2</sup> 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000

**摘要** 扩展伪随机编码可以解决高重频激光测距在目标距离远时带来的距离模糊问题,但其编码方式多样。研究了不同激光源发射重频下,不同幅度编码方式对测距准确性的影响,并使用 Matlab 进行仿真。理论研究与仿真结果表明随着重频的提高,最优编码中“1”的概率从 1 逐渐趋近于 1/2,1/2 码的随机性最好,探测效率高,在时依然具有明显的峰值。在实际测距应用中,根据不同的重频选择合适的编码方式,可以优化测距算法,提高测距效率。

**关键词** 测量; 扩展伪随机编码规则; 算法优化仿真; 高重频激光测距

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.051204

## Extended Pseudo-Random Coding Rules with Different Repetition Frequency Based on Single Photon Detection

Chen Yu<sup>1,2</sup>, Yang Yi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang, Henan 471000, China;

<sup>2</sup> Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang, Henan 471000, China

**Abstract** The extended pseudo-random encoding can solve the problem of the fuzzy distance, which is brought by high repetition frequency laser ranging in long target distance. But the extended pseudo-random coding methods are diverse. The effects of different amplitude encoding modes on the ranging accuracy are studied under different laser source repetition frequencies, and the Matlab simulation is carried out. The theory and simulation results show that the probability of "1" in optimal coding trends from 1 to nearly 1/2 with the increase of repetition frequency. When the probability is 1/2, the randomness is the best and the detection efficiency is high. The peak value is still obvious in weak noise environment. Therefore, in the practical application of distance measurement, choosing the appropriate coding method according to different repetition frequencies can optimize the ranging algorithm and improve the ranging efficiency.

**Key words** measurement; extended pseudo-random coding rule; algorithm optimization simulation; high repetition laser ranging

**OCIS codes** 120.0280; 280.3400; 030.6600; 040.1345

## 1 引言

随着武器系统的发展,激光雷达对测程的要求越来越高,利用单光子探测器获取弱光可以很好地提高测程。脉冲激光器的重复频率在几十赫兹,为了获得高分辨率的距离信息,需要提高激光脉冲的重复频率,在大气探测中伪随机码调制的激光测距方式被广泛使用<sup>[1]</sup>。将连续光源通过伪随机码进行调制,以脉冲串的形式发射,降低了系统对峰值功率的要求,提高了测距的重复频率。然而采用高重复激光源会带来距离模糊问题。

将编码解调理论应用到测距技术中可以解决距离模糊问题,同时编码后回波即使在战场中被截获也难以被破译,有利于信息保密安全。文献[2]提出了在超声测距中使用脉冲压缩技术提高测距能力的思路,使

收稿日期: 2017-01-06; 收到修改稿日期: 2017-01-23

作者简介: 陈雨(1992—),女,硕士研究生,主要从事机载激光测距系统方面的研究。E-mail: 1046979948@qq.com

导师简介: 羊毅(1965—),女,博士,研究员,主要从事机载光电探测系统方面的研究。E-mail: yyi613@163.com

用伪随机序列作为脉冲压缩信号对发射信号进行调制,在接收端与参考信号进行相关运算,从而得到超声信号的精确往返时间。文献[3]中使用伪随机序列对光纤激光器进行幅度调制,分析了系统参数和系统信噪比的关系,其使用的光纤激光器发射频率高达 1 GHz。文献[4]使用 1 GHz 调制伪随机序列光纤激光器进行了测距实验,直接模拟目标回波波形,然而相关运算量太大,且没有考虑距离未知的目标等复杂情况。文献[5]建立了伪随机码测距的系统测距模型,提出了选择最佳码型可以获得最佳信噪比,但是未能探索不同码型与探测效率的关系。文献[6]通过扩展伪随机编码验证了 2 kHz 重频下 1/2 编码并不是最优,7/8 编码兼顾随机性和抗干扰性的特点,优化了算法。文献[6]提出将脉冲叠加次数  $N$  由 40 提高到 160,使用 1/2 调制编码扩展伪随机序列与  $N=40$  未调制序列的信噪比相同,但调制序列有较好的随机性。因此提高脉冲叠加次数,使用伪随机码 1 的比例  $p=1/2$  的序列进行调制是提高测距能力的一个重要途径。文献[7]设计  $p=0.1$  的伪随机序列,并提出增加  $p$  可以增大信号的探测效率,但是噪声的相关程度变高。

然而,在不同重频下,最优编码的方式并不是一成不变的,探索其中的关系可以优化算法,提高探测效率。本文研究了不同激光源发射重频下,不同幅度编码方式对测距准确性的影响,得出随着重频提高,最优编码中“1”的概率从 1 到越来越趋近于 1/2 的结论,并通过 Matlab 仿真验证该结论。

## 2 基本原理

### 2.1 测距原理与距离模糊

激光测距原理为

$$l = ct/2, \quad (1)$$

式中  $t$  为发射激光到探测接收的时间, $c$  为光速, $l$  为目标距离。

测距中激光源重频为  $f$ ,则周期为  $T=1/f$ 。以周期  $T$  发射激光,当距离超过  $cT/2$  时,飞行时间会超过回波信号的计数周期,带来距离模糊问题。设

$$t = nT + t', \quad (2)$$

即前  $n$  列回波中没有激光反射脉冲,若激光源发射  $N$  列脉冲,则至少记录  $N+n$  列回波才可探测到信号,第一次回波信号位于  $n+1$  列的  $t'$  处。

直接测距量程  $L_0=cT/2$ ,单次测距中发射  $N$  列激光脉冲,即使用  $N$  位编码,测距机的预设量程为  $L=NL_0$ 。可知,随着激光发射重频的提高,直接测距量程  $L_0$  降低,但是随着编码位数的提高,测距机的量程提高。得出测距机测程和编码位数、激光器重频的关系为

$$L = N \cdot L_0 = \frac{c}{2} \cdot \frac{N}{f}, \quad (3)$$

因此在设计固定量程激光器时,可以根据需要合理选择编码位数和激光重频。

当最大测程不变,重频与编码位数的关系如表 1 所示。

表 1 最大测程 100 km 时重频与编码位数的关系

Table 1 Relationship between the repetition frequency and the number of bits in the maximum range of 100 km

Repetition frequency /kHz	Number of bits	Repetition frequency /kHz	Number of bits
12	8	120	80
60	40	240	160

对于目标位置的测距,分为两步分别计算不模糊时间和周期差:1) 将每一位编码后的回波信号叠加,光子数取到最大值,信号总在最大值位置  $m'$  对应的  $t'$  处出现,由此得到光子到达探测器的不模糊时间;2) 再根据调制测距的思路,在回波第  $m'$  列对应的序列  $g(x)$  中使用调制信号对其相关解调,得出发射脉冲  $f(x)$  与接收脉冲的周期差  $n$ ,两者相加可得到目标的唯一距离。

回波  $g(x)$  等于反射的激光信号与噪声叠加,激光信号延迟  $n$  列回波周期。相关运算后得

$$C = \sum_{i=0}^{N+2n-1} (-1)^{g(x)+f(x+i)}, \quad x=0,1,\dots,2n-1. \quad (4)$$

$f(x)$  的随机性越好, $n$  位置的相关值最大。因此取相关值最大的位置即为发射与接收信号的周期差  $n$ 。

## 2.2 光子计数测距数学模型

当激光脉冲照射到朗伯目标时,单光子探测器能够对回波光子进行响应并产生平均光电子数,可由激光雷达方程计算。微脉冲激光测距将回波功率的计算转化为回波光子数的计算,根据激光雷达测距方程,经目标反射到达探测器的回波光子数为

$$n_s = \frac{E_T \eta_T \eta_r \eta_q \rho A_T A_s \cos \theta}{\pi h \nu \Omega R^4} T_a^2, \quad (5)$$

式中  $E_T$  为激光单脉冲能量,  $\eta_T$  为发射光学系统透射率,  $\eta_r$  为接收光学系统的透射率,  $\eta_q$  为探测器量子效率,  $\rho$  为目标表面的反射率,  $A_T$  为接收光学系统的有效接收面积,  $A_s$  为目标反射面积,  $\theta$  为目标反射面法线与发射系统光轴的夹角,  $h\nu$  为发射激光中单个光子的能量,  $\Omega$  为发射激光的立体角,  $R$  为激光测距系统与目标的距离,  $T_a$  为单程大气透射率。

激光测距系统在接收回波信号的同时会接收到背景光噪声,其主要由目标对太阳光的反射和太阳光的大气散射两部分组成。将目标看作朗伯散射面  $P_d = \exp(-n_b) \times [1 - \exp(-n_s - n_b)]$ , 目标完全在接收视场内,单位时间(1 s)内到达探测器的背景噪声光子数为

$$n_b = \left[ \frac{\pi}{16h\nu} (T_a \rho H_\lambda \cos \theta \cos \vartheta + \pi L_\lambda) \right] \times (\eta_r \theta_r^2 d_r^2 \Delta \lambda), \quad (6)$$

式中  $H_\lambda$  为太阳光对地面的光谱辐射照度,  $L_\lambda$  为太阳光大气散射的光谱辐射亮度,  $\theta$  为太阳射线和目标表面法线的夹角,  $\vartheta$  为目标表面法线与接收光轴之间的夹角,  $\eta_r$  为接收光学系统的透射率,  $\theta_r$  为接收视场角,  $d_r$  为接收光学系统的物镜直径,  $\Delta \lambda$  为窄带滤光片的光谱带宽。

由(6)式可以得出,主要通过减小接收视场角和窄带滤光来抑制噪声。

## 2.3 伪随机编码

伪随机编码有幅度、位置、相位等多种调制方式,位置和相位调制多用于测距精度要求高的场合,要求远距离时一般采用幅度调制。本文采用幅度调制,调制后激光发射时序图如图1所示。

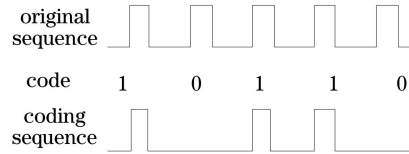


图1 幅度调制伪随机编码时序图

Fig. 1 Amplitude modulated pseudo-random coding timing diagram

## 2.4 编码位数与探测概率

回波信号与噪声信号满足泊松分布。有效探测到信号指在回波信号到达前没有光子触发探测器,而在回波信号到达时刻,探测器响应。虚警即是没有回波信号到达,探测器依然响应,做出了错误的判断。探测概率和虚警率是激光测距系统中两项非常重要的指标。

在一个脉冲周期内对回波光子数实现有效探测的概率为

$$P_d = P[(t_0, t), N = 0] \cdot P(t, N \geq K). \quad (7)$$

理想情况下探测器对单个光子即可响应,即探测阈值  $K = 1$ 。光子数  $n = n_s + n_b$ , 其中  $n_s$  为信号光子数,  $n_b$  为噪声光子数,代入(5)式,得

$$P_d = \exp(-n_b) \times [1 - \exp(-n_s - n_b)], \quad (8)$$

虚警概率为

$$P_f = 1 - P_d - \exp(-n_s - n_b). \quad (9)$$

对  $N$  个周期的回波信号进行累加,累加后  $N_s$  为信号光子数,  $N_b$  为噪声光子数,超过阈值  $K_{th}$  即认为是回波信号,则系统的探测概率为

$$P_D = P(N_s \geq K_{th}) = 1 - \exp(-N_s) \sum_{k=0}^{K_{th}-1} \frac{N_s^k}{k!}. \quad (10)$$

系统的虚警率为

$$P_F = 1 - \left[ \exp(-N_b) \sum_{k=0}^{K_{th}^{bin}-1} \frac{N_b^k}{k!} \right]^{N_{bin}}, \quad (11)$$

式中  $N_{bin}$  为一个距离门内的距离窗, 引入噪声对比度  $C = 1 + N_s/N_b$ 。在系统参数设计中, 希望有高的探测效率和低的虚警率。对(10)、(11)式联立取导数, 可以求出最佳探测阈值为

$$K_{opt} = \frac{N_s + \ln N_{bin}}{\ln C}. \quad (12)$$

对于伪随机编码来说,  $N$  位编码中 1 的概率为  $p$ , 那么相当于  $L = N \cdot p$  个有信号的周期和  $N - L$  个噪声周期叠加。

叠加后信噪比为

$$R' = \frac{N}{\sqrt{N + 2n - 1}} pR. \quad (13)$$

随着积累次数的增大, 探测概率越来越大, 虚警概率越来越小。

定义噪声比为噪声与信号的幅度比值  $N_b/N_s$ , 例如噪声比为 1/8 即噪声与信号的幅度比为 1/8。噪声比选取 0, 1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 7/8 共 6 种, 激光重频为 10 kHz, 脉冲发射周期为  $T = 0.1$  ms, 单光子探测器计数率为  $f = 50$  MHz, 在一个距离门 0.1 ms 内, 有 5000 个距离窗, 背景噪声采用 0.2 mrad 的接收角和 0.5 nm 滤光片, 根据(6)式得背景噪声为  $10^7$  个, 理想情况下探测器量子效率为 1, 20 ns 内噪声数为 0.2 个。根据(5)、(6)、(10)、(11)、(12)式计算满足探测概率和虚警率要求的脉冲个数和能量参数, 绘制出 10 kHz 重频时不同噪声数对应的探测概率, 如图 1 所示。

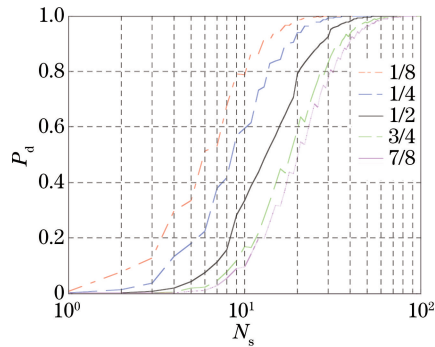


图 2 10 kHz 重频时不同噪声数对应的探测概率

Fig. 2 Detection probability curve with different noises under repetition frequency of 10 kHz

计算 10 kHz 和 100 kHz 重频时满足探测概率大于 95%、虚警概率小于 1% 所需要的每帧回波信号光电子数(发射一串回波脉冲为一帧), 结果如表 2 所示。

表 2 10 kHz 与 100 kHz 重频时满足探测概率大于 95% 所需要的每帧回波信号光电子数

Table 2 Photoelectron number of echo signals per frame for detection probability over 95% with repetition frequency of 10 kHz and 100 kHz

Noise	$N_s$ @10 kHz	Number of pulses @10 kHz	$N_s$ @100 kHz	Number of pulses @100 kHz
1/8	17	10.625	13	8.125
1/4	22	27.5	19	23.75
1/2	31	77.5	28	70
3/4	42	157.5	35	131.25
7/8	47	205.625	40	175

计算 10 kHz 时每脉冲的回波信号光电子数、所需脉冲个数和单脉冲能量, 结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 随着噪声的增大, 所需脉冲个数增加, 单脉冲发射能量降低, 在系统设计中需要优化参数, 综合考虑, 认为 10 kHz 重频下, 单光子探测器计数率  $f = 50$  MHz, 背景噪声采用 0.2 mrad 的接收角和 0.5 nm 滤光片, 选取 16 次脉冲积累可以达到探测概率 95% 以上, 虚警率 1% 以下的要求。

表 3 10 kHz 重频时系统参数设计

Table 3 Design of system parameters with repetition frequency of 10 kHz

Noise	$N_s$	$n_s$	Number of pulses	$E_T/\text{mJ}$
1/8	17	1.6	10.625	15.5139
1/4	22	0.8	27.5	7.6953
1/2	31	0.4	77.5	3.8477
3/4	42	0.267	157.5	2.5651
7/8	47	0.229	205.625	2.1987

## 2.5 扩展伪随机码生成

为了得到更好的信号处理算法,需要仿真出具有不同噪声强度的 0/1 序列。伪随机码是 0,1 各占 1/2 比例的序列<sup>[8]</sup>,扩展伪随机码是 0,1 比例可变的序列<sup>[6]</sup>。 $m$  序列是一种常用的伪随机序列,采用移位寄存器生成<sup>[9-10]</sup>。寄存器级数为  $k$ , $k$  越大,序列中 0,1 的比例越接近 1/2,随机性越好,极端情况全 0 和全 1 序列毫无随机性。 $m$  序列周期为  $2^k - 1$ ,因此已知某序列周期,可以通过  $k = \log_2(m + 1)$  求得移位寄存器级数。表 4 展示了部分阶数  $m$  序列码的生成方式。

表 4 2 至 21 阶  $m$  序列码反馈多项式Table 4 Feedback polynomials of  $m$ -sequences from 2 to 21 orders

Order	$h(x)$	Order	$h(x)$
2	$x^2 + x + 1$	12	$x^{12} + x^7 + x^4 + x^3 + 1$
3	$x^3 + x + 1$	13	$x^{13} + x^4 + x^3 + x + 1$
4	$x^4 + x + 1$	14	$x^{14} + x^{12} + x^{11} + x + 1$
5	$x^5 + x + 1$	15	$x^{15} + x + 1$
6	$x^6 + x + 1$	16	$x^{16} + x^5 + x^3 + x^2 + 1$
7	$x^7 + x + 1$	17	$x^{17} + x^3 + 1$
8	$x^8 + x^6 + x^5 + x + 1$	18	$x^{18} + x^7 + 1$
9	$x^9 + x^4 + 1$	19	$x^{19} + x^6 + x^5 + x + 1$
10	$x^{10} + x^3 + 1$	20	$x^{20} + x^3 + 1$
11	$x^{11} + x^2 + 1$	21	$x^{21} + x^2 + 1$

不同的  $m$  序列进行逻辑运算可以得到扩展伪随机序列,如表 5 所示,序列中 1 的比例符合概率运算准则。

表 5 序列运算方式

Table 5 Operation of sequences

$k$	1	2	3	4	5
Operation	$M(k+2) \&$ $M(k+1) \& M(k)$	$M(k+2) \&$ $M(k+1)$	$M(k+2)$	$M(k+2)  $ $M(k+1)$	$M(k+2)  $ $M(k+1)   M(k)$
Probability	1/8	1/4	1/2	3/4	7/8

常用的单光子探测器盖革模式下的雪崩光电二极管(GM-APD)不具有光子数分辨能力,在探测周期内只响应光子有无,不区分个数<sup>[11-12]</sup>。因此可以利用 0,1 随机数来表示探测器对光子的响应,“0”表示未接收到光子,“1”表示接收到至少一个光子。也可以利用 0,1 随机数来表示探测器对噪声的误判,“0”表示未接收到光子,“1”表示接收到至少一个光子。那么在接收到光子数一定的情况下,信噪比与探测的背景噪声有关,由于滤波、大气的影响,造成噪声较大,在实验中选取 6 种不同程度的噪声。

## 2.6 优化编码探索

2.3 节探索了在 10 kHz 系统参数设计下选取编码 16 个脉冲的方式较为优化,所取的是  $p=1$  的 16 位编码,当  $p=1/2$  时,信号减半,噪声不变,近似地认为选取 32 位编码较为合适。

在 100 kHz 系统下,采用同样的探测器,计数率不变,同样条件下探测窗变为 1/10,相当于提高了信噪比,由于表 2 认为 8 个脉冲编码即可满足要求( $p=1$ ),那么随着叠加次数的升高,当  $p=1/2$  时,编码位数相应增加。在高重频测距时,信号周期短,多次叠加后,虽然数据量提高,但极大改善了信噪比,且不会降低测距的实时性,而探索 1/2 的编码在调制解调的相关性,在分步计算下可以消除距离模糊,得到目标的准确距离。

### 3 实验结果与讨论

验证 10 kHz 下 16 位编码的效率。设计仿真参数:激光重频 10 kHz,脉冲发射周期  $T=0.1$  ms,直接测距量程  $L_0=cT/2=15$  km,单光子探测器计数率  $f=50$  MHz,每列回波信号序列长度  $N_0=fT=5000$ ;单次测距中发射  $N$  列激光脉冲,测距机的预设量程为  $8L_0=120$  km,目标距离  $L=66$  km,激光飞行时间  $t=2L/c=0.44$  ms, $t$  分解后  $n=4$ , $t'=0.04$  ms,则需连续记录  $N+2n-1$  个周期的回波数据, $t$  对应回波周期位置为 2000。

回波信号通过产生目标位置信号和噪声信号与运算得到。目标延迟 4 个周期,所以使用  $\{0,0,0,0, f(x),0,0,0\}$  来表示。

噪声序列通过生成相应长度的伪随机码来替代。序列长度  $(N+7) \cdot N_0$ ,则出现不重复序列要求  $m$  序列阶数通过 2.5 节的讨论,为  $n=\log_2[(N+7)N_0+1]$ 。不同比例噪声通过 3 列伪随机码构造,构造方式如表 2 所示。相关解调后,在 4 的位置相关值最大。

有代表性地选取  $p=1/2,3/4,7/8,1$  的调制序列,噪声比选取  $0,1/8,1/4,1/2,3/4,7/8$  共 6 种噪声。

1) 发射 16 次脉冲叠加, $p=1/2$ ,此时调制序列  $f(x)$  中包含 8 个“1”,可得图 3 所示的光子叠加直方图、图 4 所示的相关函数分布图和表 6 所示的最大叠加值分布。

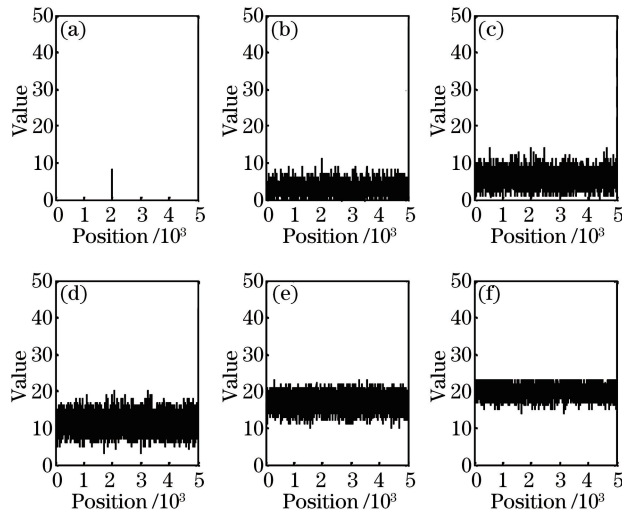


图 3 不同噪声比下光子叠加直方图( $p=1/2$ )。(a)噪声比为 0;(b)噪声比为 1/8;(c)噪声比为 1/4;(d)噪声比为 1/2;(e)噪声比为 3/4;(f)噪声比为 7/8

Fig. 3 Photons stacking histograms under different noise ratios ( $p=1/2$ ). (a) Noise ratio is 0; (b) noise ratio is 1/8; (c) noise ratio is 1/4; (d) noise ratio is 1/2; (e) noise ratio is 3/4; (f) noise ratio is 7/8

表 6 最大叠加值分布( $p=1/2$ )

Table 6 Distributions of the biggest stacking values ( $p=1/2$ )

Noise	0	1/8	1/4	1/2	3/4	7/8
Value	8	11	14	20	23	23
Position	2000	2000	544	2066	282	4

2) 发射 16 次脉冲叠加, $p=3/4$ ,此时调制序列  $f(x)$  中包含 12 个“1”,可得图 5 所示的光子叠加直方图、图 6 所示的相关函数分布图和表 7 所示的最大叠加值分布。

表 7 最大叠加值分布( $p=3/4$ )

Table 7 Distributions of the biggest stacking values ( $p=3/4$ )

Noise	0	1/8	1/4	1/2	3/4	7/8
Value	12	14	16	21	23	23
Position	2000	2000	2000	2000	282	4

3) 发射 16 次脉冲叠加, $p=1$ ,此时调制序列  $f(x)$  中包含 16 个“1”,即为正常发射,无调制,序列不具有随机性。可得图 7 所示的光子叠加直方图、图 8 所示的相关函数分布图和表 8 所示的最大叠加值分布。

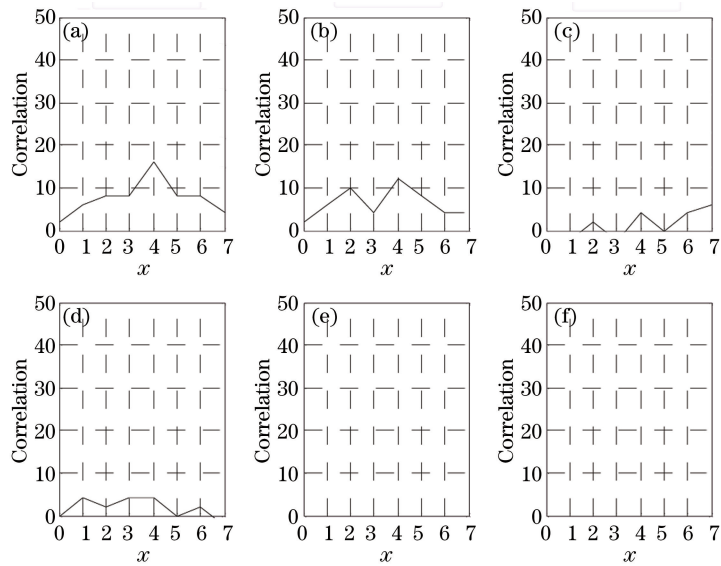


图4 不同噪声比下相关函数分布图( $p=1/2$ )。(a)噪声比为0;(b)噪声比为1/8;(c)噪声比为1/4;  
(d)噪声比为1/2;(e)噪声比为3/4;(f)噪声比为7/8

Fig. 4 Distributions of correlation function under different noise ratios ( $p=1/2$ ). (a) Noise ratio is 0; (b) noise ratio is 1/8; (c) noise ratio is 1/4; (d) noise ratio is 1/2; (e) noise ratio is 3/4; (f) noise ratio is 7/8

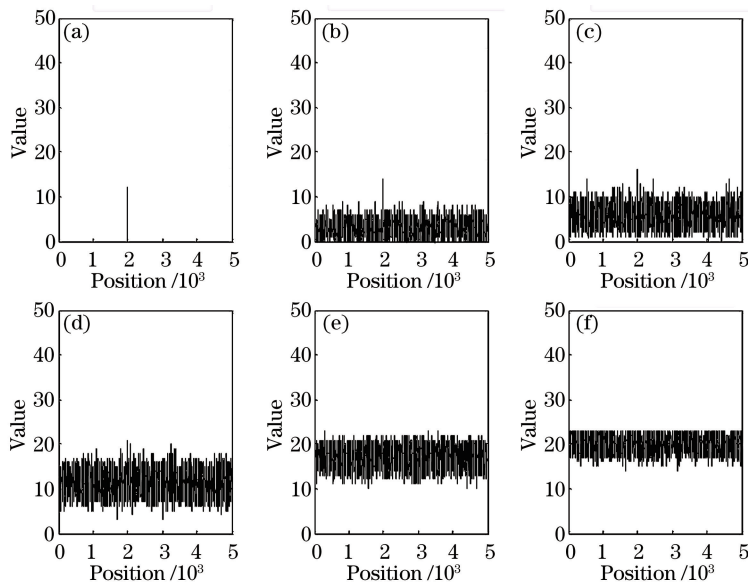


图5 不同噪声比下光子叠加直方图( $p=3/4$ )。(a)噪声比为0;(b)噪声比为1/8;(c)噪声比为1/4;  
(d)噪声比为1/2;(e)噪声比为3/4;(f)噪声比为7/8

Fig. 5 Photons stacking histograms under different noise ratios ( $p=3/4$ ). (a) Noise ratio is 0; (b) noise ratio is 1/8; (c) noise ratio is 1/4; (d) noise ratio is 1/2; (e) noise ratio is 3/4; (f) noise ratio is 7/8

表8 最大叠加值分布( $p=1$ )

Table 8 Distributions of the biggest stacking values ( $p=1$ )

Noise	0	1/8	1/4	1/2	3/4	7/8
Value	16	17	18	21	23	23
Position	2000	2000	2000	2000	282	4

对比图3、5、7和表6、7、8可以看出,调制序列中1所占比例 $p$ 越大,叠加后信噪比越大,提取能力越强。对比图4、6、8可以看出, $p=1$ 时序列相关性最差, $p=1/2$ 时序列相关性最好。然而当重频较低时,叠加信噪比本身就很低,使用伪随机码后信噪比更低,因此使用全1序列,探测概率更高。结合文献[5]中在40次

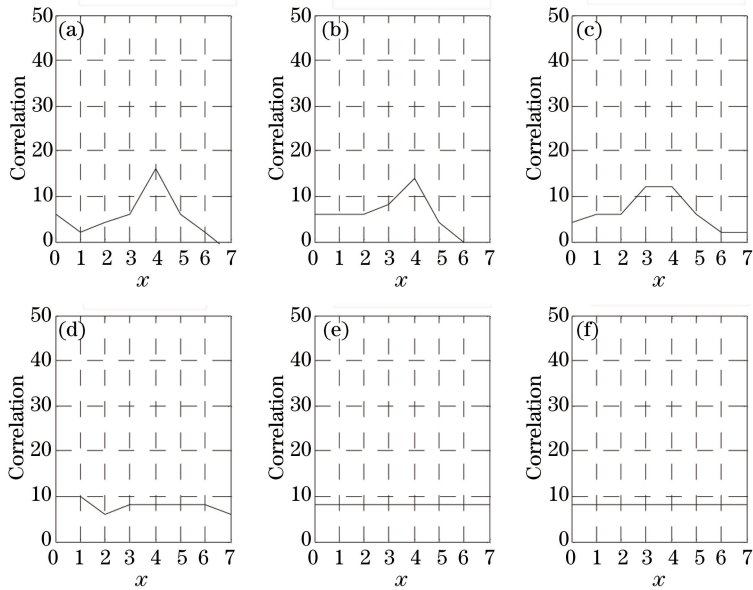


图 6 不同噪声比下相关函数分布图( $p=3/4$ )。(a)噪声比为 0;(b)噪声比为 1/8;(c)噪声比为 1/4;  
(d)噪声比为 1/2;(e)噪声比为 3/4;(f)噪声比为 7/8

Fig. 6 Distributions of correlation function under different noise ratios ( $p=3/4$ ). (a) Noise ratio is 0; (b) noise ratio is 1/8;  
(c) noise ratio is 1/4; (d) noise ratio is 1/2; (e) noise ratio is 3/4; (f) noise ratio is 7/8

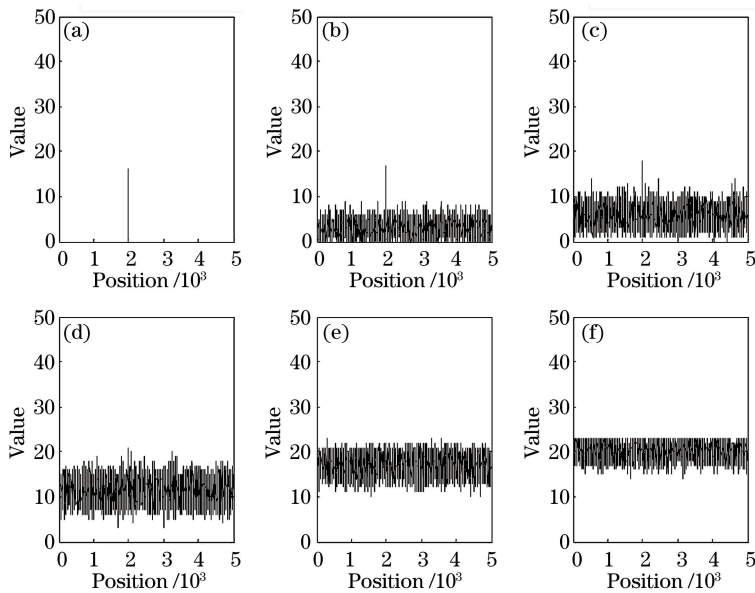


图 7 不同噪声比下光子叠加直方图( $p=1$ )。(a)噪声比为 0;(b)噪声比为 1/8;(c)噪声比为 1/4;  
(d)噪声比为 1/2;(e)噪声比为 3/4;(f)噪声比为 7/8

Fig. 7 Photons stacking histograms under different noise ratios ( $p=1$ ). (a) Noise ratio is 0; (b) noise ratio is 1/8;  
(c) noise ratio is 1/4; (d) noise ratio is 1/2; (e) noise ratio is 3/4; (f) noise ratio is 7/8

叠加时 7/8 编码较好的结论,推测随着重频的提高,编码方式相关性越好,探测效率越高。验证了在 16 位编码下, $p=1$  的效率最高。

探索多次累加不同  $p$  对测距效率的影响。分别进行发射脉冲 0/1 编码后叠加 8~160 次的实验,叠加了每帧的 0 和 1 次数,编码方式 4 种,噪声 6 种,列出仿真实验结果,如表 9 所示。表 9 代表了不同编码长度和编码方式下,噪声不高于多少可检出正确距离。如第 2 列,16 位编码下,1/2 码在 1/8 噪声比中可以顺利检出,综合考虑用 1 码性能最佳。



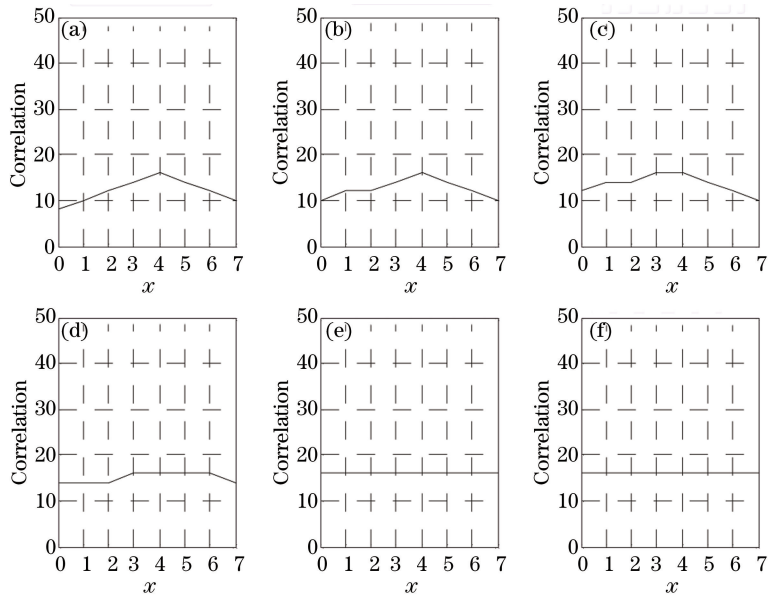


图 8 不同噪声比下相关函数分布图( $p=1$ )。(a)噪声比为 0;(b)噪声比为 1/8;(c)噪声比为 1/4;  
(d)噪声比为 1/2;(e)噪声比为 3/4;(f)噪声比为 7/8

Fig. 8 Distributions of correlation function under different noise ratios ( $p=1$ ). (a) Noise ratio is 0; (b) noise ratio is 1/8; (c) noise ratio is 1/4; (d) noise ratio is 1/2; (e) noise ratio is 3/4; (f) noise ratio is 7/8

表 9 10 kHz 重频时叠加次数与编码规则

Table 9 Stacking times and coding rules under repetition frequency of 10 kHz

Signal code $x$	1/2	3/4	7/8	1	Code
8	0	0	0	1/8	1
16	1/8	1/8	1/8	1/8	
24	1/4	1/4	1/4	0	7/8
32	1/4	1/2	1/2	1/2	
40	1/4	1/2	1/2	0	
48	1/4	1/2	1/2	0	
56	1/4	1/2	1/4	0	3/4
64	1/2	3/4	1/2	0	
112	3/4	3/4	3/4	0	
160	7/8	3/4	3/4	0	1/2

分析 100 kHz 下的探测概率,由表 2 可知,8 位编码可以达到系统要求,进行不同累加次数的探测效率。表 10 所示的是 100 kHz 重频时的叠加次数与编码规则。

表 10 100 kHz 重频时叠加次数与编码规则

Table 10 Stacking times and coding rules under repetition frequency of 100 kHz

Signal code $x$	1/2	3/4	7/8	1	Code
8	1/8	1/8	1/8	1/8	1
16	1/4	1/4	1/4	0	7/8
24	1/4	1/2	1/2	1/2	
32	1/4	1/2	1/2	0	
40	1/4	1/2	1/2	0	
48	1/4	1/2	1/4	0	3/4
56	1/2	3/4	1/2	0	
64	3/4	3/4	3/4	0	
112	7/8	3/4	3/4	0	1/2

可以看出,随着重频的提高,出现先 1 码,再 7/8 码,再 3/4 码,再 1/2 码的趋势,总体来说,1/2 码的随机性最好,探测效率高,在弱噪声时依然具有明显的峰值。因此在设计激光测距系统时,要根据激光发射重频相应地选取编码方式,以期达到最优。

单光子计数器的计数频率 50 MHz 以上,在 10 kHz 重频下回波序列长度为 5000,100 kHz 重频下回波序列长度为 500,当计数器频率低于 10 MHz,对于长度为 100 的 100 kHz 重频下的回波序列,没有足够的计数脉冲,不能满足表 10 最优下使用 112 个脉冲编码达到 1/2 码性能最优的条件,所以针对计数器频率较低的情况,要综合考虑。

## 4 结 论

研究了编码方式与激光发射重频的关系,通过理论与仿真实验,可以看出,随着重频的提高,最优编码呈先 1 码,再 7/8 码,再 3/4 码,再 1/2 码的趋势。总体来说,1/2 码的随机性最好,探测效率高。因此在设计激光测距系统时,要根据激光发射重频相应地选取编码方式。重频越高,越应选择 1/2 伪随机码;当不能达到高重频时,选取适当的编码如 7/8 或 3/4 可以兼顾随机性与抗噪声的优点,又不会使信噪比太低,有利于正确距离的检出。

本文只选择了固定概率的编码和噪声,在后续中可以进一步研究任意概率编码和重频的对应关系。

## 参 考 文 献

- [1] Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, *et al.* Fiber laser ranging system based on different pseudorandom code modulation [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0614003.  
杨芳,张鑫,贺岩,等.基于不同伪随机码调制的光纤激光测距系统[J].中国激光,2014,41(6):0614003.
- [2] Cheng Xiaochang, Su Shaojing, Wang Yueke, *et al.* Algorithm and design for pseudo-random sequence ultrasonic spread spectra distance measurement system[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, 21(1): 79-83.  
程晓畅,苏绍景,王跃科,等.伪随机码超声扩频测距系统设计与算法[J].测试技术学报,2007,21(1):79-83.
- [3] Yang Fu, He Yan, Zhou Tianhua, *et al.* Simulation of space-borne altimeter based on pseudorandom modulation and single-photon counting[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 21-26.  
杨馥,贺岩,周田华,等.基于伪随机码调制和单光子计数的星载测高计仿真[J].光学学报,2009,29(1):21-26.
- [4] Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. Study of fiber laser ranging system using pseudo-random modulation and single photon counting techniques[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0314003.  
杨馥,贺岩,陈卫标.基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测距研究[J].中国激光,2011,38(3):0314003.
- [5] Shen Shanshan, Chen Qian, He Weiji, *et al.* Research on performance of random bitstream ranging system based on single photon detection theory[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1012001.  
沈姗姗,陈钱,何伟基,等.基于单光子探测机理的伪随机码测距性能研究[J].光学学报,2014,34(10):1012001.
- [6] Wu Xingguo, Yang Yi, Hao Peiyu. Unambiguous laser ranging technology based on extended pseudo-random modulation[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0408001.  
吴兴国,羊毅,郝培育.消除距离模糊的扩展伪随机码调制激光测距技术[J].中国激光,2016,43(4):0408001.
- [7] Hiskett P A, Parry C S, McCarthy A, *et al.* A photon-counting time-of-flight ranging technique developed for the avoidance of range ambiguity at gigahertz clock rates[J]. Opt Express, 2008, 16(18): 112-119.
- [8] Ma Fei. Correlation of binary sequences[D]. Wuhan: Hubei University, 2012: 6-10.  
马菲.二元序列相关性质的研究[D].武汉:湖北大学,2012:6-10.
- [9] Tu Chunyong, Zhang Wei. A method for generation of longer-period m-sequence[J]. Electronic Engineer, 2008, 34(7): 19-21.  
涂春勇,张炜.一种更长周期 m 序列的实现方法[J].电子工程师,2008,34(7):19-21.
- [10] Wang Lin, Rui Guosheng, Tian Wenbiao. Gaussian white noise generating based on FPGA [J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(3): 104-106.  
王林,芮国胜,田文彪.基于 FPGA 的高斯白噪声生成[J].现代电子技术,2011,34(3):104-106.
- [11] Ren Min. Study on high-speed single photon detection and application[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013: 10-11.  
任昱.高速单光子探测及应用研究[D].上海:华东师范大学,2013:10-11.
- [12] Xuan Fei, Xin Huan, Cao Changdong, *et al.* Study of micro pulse single photon under water ranging technology[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 983-985.  
宣飞,辛欢,曹昌东,等.水下微脉冲激光雷达单光子测距计数研究[J].激光与红外,2011,41(9):983-985.