

消除距离模糊的扩展伪随机码调制激光测距技术

吴兴国^{1,2} 羊毅² 郝培育²

¹光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009

²中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009

摘要 单光子测距中采用高重复频率激光源可提高回波信噪比,同时会带来距离模糊问题。为消除距离模糊,基于调制测距和时间相关光子计数理论设计了一种测距技术,分步计算得到脉冲飞行时间所包含的不模糊时间和激光发射周期的倍数,进而得到距离。该技术具有运算量小和测距效率高等优点。基于 m 序列得到“1”所占比例可变的扩展伪随机序列,用来模拟噪声,并作为激光发射调制信号。测距仿真中比较了3种扩展伪随机序列的调制测距能力,结果表明:“1”所占比例为7/8的扩展伪随机序列兼顾了随机性和抗噪声能力,得到了优于全“1”序列和 m 序列的调制测距效果。

关键词 测量; 激光测距; 调制测距; 距离模糊; 单光子; 伪随机码

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0408001

Unambiguous Laser Ranging Technology Based on Extended Pseudo-Random Modulation

Wu Xingguo^{1,2} Yang Yi² Hao Peiyu²

¹Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang, Henan 471009, China

²Luoyang Institute of Electro-Optical Devices, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471009, China

Abstract In single photon ranging, increasing repeating frequency can improve the echo signal-to-noise ratio and result in ambiguous distance. To avoid ambiguous distance, an arithmetic based on modulation ranging and time-correlated photon counting theory is proposed, by which the unambiguous time and multiple of laser emitting periods are calculated, and then the unambiguous distance is obtained. This technology needs less computation and is more effective. Extended pseudo-random sequences with variable proportion of “1” are derived from m -sequence, and they act as noise model and modulation signal. In simulation, ranging results with three different sequences are compared and it shows the pseudo-random sequences with proportion of “1” as 7/8 are random and noise resistant, of which the ranging result is better than that of all “1” sequence and m -sequence.

Key words measurement; laser ranging; modulation ranging; ambiguous distance; single photon; pseudo-random code

OCIS codes 280.3400; 120.0280; 030.6600; 040.1345

1 引言

单光子测距采用了新的测距体制,在设备体积和质量等受限的机载环境下可实现远距离测距,具有很好的研究价值和应用前景。随着激光器技术的发展,千赫兹激光器被逐渐应用到测距中^[1-5]。提高发射重复频率可在一定时间内积累更多的回波光光子,从而提高信噪比,增强距离检测能力;另外,发射重复频率的提

收稿日期: 2015-11-20; 收到修改稿日期: 2015-12-03

基金项目: 航空科学基金(2014ZC13004)

作者简介: 吴兴国(1988—),男,硕士研究生,主要从事信息处理与计算机技术方面的研究。

E-mail: singularwoo@foxmail.com

导师简介: 羊毅(1965—),女,博士,研究员,硕士生导师,主要从事机载光电技术研究及机载光电系统方面的研究。

E-mail: yyi613@163.com

高,使得脉冲周期减小,对远距离目标测距时会出现距离模糊问题。

将编码解调理论应用于测距技术,目前得到了一定的成果。文献[6]提出在超声测距中使用脉冲压缩技术来提高测距能力的思路,使用伪随机序列作为脉冲压缩信号对发射信号进行调制,在接收端将测得信号与参考信号进行相关运算,从而得到超声信号精确的往返时间。文献[7-10]使用伪随机序列调制光纤激光器,对距离范围已知的合作目标进行测距研究,使用全部回波信号与调制信号(序列长度可达到 5×10^5 量级)进行相关解调。若用于距离范围未知的非合作目标测距,相关运算量极大,效率较低。

本文基于脉冲编码和时间相关光子计数理论,提出一种可消除距离模糊的测距技术,采用分步计算的方法可大大降低运算量。另外,探究了码元所占比例可调的扩展伪随机码的生成方式,并分析其相关性,可以此作为噪声模型和激光发射脉冲的调制信号。算法仿真对比了不同编码的调制测距能力,可为后续研究提供参考。

2 测距原理分析

激光脉冲发射时开始计时,测得激光射向目标并由目标反射回探测器的时间为 t ,光速为 c ,则目标距离 l 为:

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

单光子测距中,激光源以周期 T 向目标连续发射多列激光,每次发射激光时启动新的计时并记录回波信号,则接收端可得到相应的多列周期为 T 的回波信号。当目标距离 l 超过直接测距量程 $L_0=cT/2$ 时,飞行时间 t 超过回波信号的计时周期 T ,出现距离模糊问题。将 t 进行分解,可得:

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

式中 $t' < T$,称为不模糊时间,对应目标的不模糊距离; n 为脉冲飞行时间所包含的计时周期 T 的整数倍,称为周期数。若能分别得到 t' 与 n 的值,即可解决距离模糊问题,实现远距离测距。

由于 $t=t'+nT$,则前 n 列回波中没有激光反射脉冲,第1个发射激光脉冲被目标反射回测距机的信号,实际上位于第 $n+1$ 列回波中时刻 t' 处,依此类推。激光发射信号和目标反射信号的时序如图1所示。

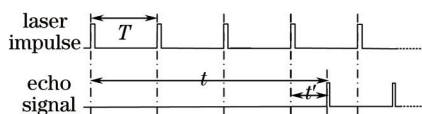


图1 激光发射信号与目标反射信号时序图

Fig.1 Timing sequence figures of laser and echo signals

若激光源连续发射 N 列激光脉冲,则接收端至少记录 $N+n$ 列回波信号才能完整记录到所有的目标反射信号。将全部回波信号进行叠加,可提高信噪比^[11]。在 t' 时刻得到较高的数据峰,以此得到 t' 值。

基于文献[7-10]中的调制测距思路,使用随机性序列对激光发射进行编码,在回波中提取出 t' 时刻的全部信号,使用调制信号对其进行相关解调,可以得出发射脉冲与反射脉冲之间的周期差 n 。

以上两步可分别得出 t' 和 n ,进而得到脉冲飞行时间 t ,再根据(1)式,即可得到目标的真实距离。

3 扩展伪随机序列

伪随机序列中,“0”和“1”随机分布且其所占比例均为 $1/2$ ^[12]。本文对伪随机序列进行扩展,定义“0”和“1”分布具有随机性的序列为扩展伪随机序列。

3.1 序列性质

扩展伪随机序列中“0”和“1”均随机分布,可认为序列任意一个位置出现“1”的概率等于序列中“1”所占的比例。设存在2个相互独立的扩展伪随机序列 $M1$ 和 $M2$,“1”所占比例分别为 p 和 q ,两序列按位进行逻辑运算得到新序列。由于 $M1$ 、 $M2$ 中“0”和“1”随机分布且两者互相独立,则运算得到的新序列中“0”和“1”仍为随机分布,序列中“1”所占的比例与“1”出现的概率相同。

两序列按位进行逻辑与运算时,只有当两序列在同一个位置都为“1”时才能得到“1”,则按位进行逻辑与运算得到的新序列中“1”出现的概率为

$$P(M1 \& M2) = pq, \quad (3)$$

两序列按位进行逻辑或运算时,只有当两位都为“0”时才得到“0”,则新序列中“1”出现的概率为

$$P(M1|M2) = 1 - (1 - p)(1 - q) = p + q - pq. \quad (4)$$

3.2 生成方式

m 序列是一种常用的伪随机序列,具有非常好的随机特性,可采用多级线性反馈移位寄存器来产生^[13-14]。寄存器级数为 n 时, m 序列周期为 $2^n - 1$,其中“1”和“0”的个数分别为 2^{n-1} 和 $2^{n-1} - 1$ 。 n 越大,序列周期越长,“1”所占比例越接近1/2,其随机性越好^[15]。下面将探讨基于 m 序列获得扩展伪随机序列的可行性。

在Matlab中产生级数分别为15、16和17的3列 m 序列,按位进行逻辑运算,截取序列前30000个数据进行周期延拓构成新序列。 $M(n)$ 表示 n 阶 m 序列,&和|分别表示两序列进行逻辑与和逻辑或运算,存在多个运算时按照从左向右的运算顺序。第 k 个序列的运算方式如表1所示。

表1 序列运算方式

Table 1 Operation of sequences

k	1	2	3	4	5	6
Operation	$M(17) \& M(16) \& M(15)$	$M(17) \& M(16)$	$M(17)$	$M(17) \& M(16) M(15)$	$M(17) M(16)$	$M(17) M(16) M(15)$

对各个序列进行自相关运算,序列 $m(x)$ 的自相关函数运算公式^[12]为

$$f_{cor}(x) = \sum_{i=1}^{30000} (-1)^{m(x) + m(x+i)}, \quad x = -14999, \dots, 0, 1, \dots, 15000, \quad (5)$$

根据(5)式得到各个序列的自相关函数分布如图2所示。

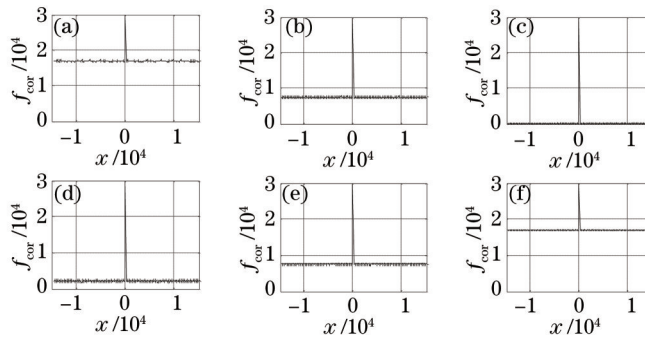


图2 (a)~(f) 序列1~6的自相关函数分布

Fig.2 (a)~(f) Auto-correlation function distributions of sequences 1 to 6

由图2可以直观地看出,每个序列的自相关函数均具有类似冲击函数的波形,在 $x=0$ 处取到最大值30000,其他位置处都接近该序列可达的最小相关值,证明这些序列均具有较好的随机性,可认为序列中“1”出现的概率等同于“1”所占比例。统计第 k 个序列中“1”的个数和所占比例,得到“1”出现概率的近似值,结果如表2所示。

表2 序列中“1”个数与比例统计

Table 2 Statistics of number and ratio of “1” in sequences

Parameter	Value					
k	1	2	3	4	5	6
Number	3764	7573	15131	18864	22513	26292
Ratio /%	12.55	25.24	50.44	62.88	75.04	87.64
Approximation	1/8	1/4	1/2	5/8	3/4	7/8

由表2可得,各个序列中“1”出现的概率近似符合(3)式与(4)式的运算法则。随着 m 序列周期增大,“1”所占的比例越来越接近50%且随机性越来越好,则新序列中“1”出现的概率越来越接近相应的近似值。

3.3 小 结

由上可得如下结论:

- 1) 不同 m 序列进行逻辑运算可得到扩展伪随机序列,序列中“1”所占比例符合概率运算法则。
- 2) 根据图2,扩展伪随机序列中,“1”所占的比例 p 为1/2的序列相关性最小,但随机性最好,随着 p 远离

1/2, 序列相关性增大导致其随机性降低。极端情况下, $p=0$ 时为全“0”序列, $p=1$ 时为全“1”序列, 此类序列已毫无随机性。

4 测距算法设计与仿真

目前应用较多的单光子探测器, 如盖格模式下的雪崩光电二极管(GAPD), 在一个探测周期内只响应光子有无, 而不区分光子个数, 即不具有光子数分辨能力^[16-17]。因此, 可以使用“0”和“1”组成的二进制数(即“0/1”)来表示一个探测周期内探测器对光子的响应, “0”表示探测器无计数脉冲输出, “1”表示探测到至少一个光子并输出计数脉冲。整个测距周期使用“0/1”序列来表示各个时刻探测器的响应情况。

算法流程设计如图3所示。设定仿真参数: 脉冲发射周期为 $T=0.5$ ms, 直接测距量程为 $L_0=cT/2=75$ km; 单光子探测器的计数率为 $f=20$ MHz, 每个回波序列长度为 $N_0=fT=10000$; 单次测距连续发射 $N=40$ 列激光脉冲, 测距机的预设量程为 $6L_0=450$ km, 须连续记录 $N+5$ (即45)个周期的回波数据; 目标距离为 $l=270$ km, 脉冲飞行时间为 $t=2l/c=1.8$ ms, t 分解后得 $n=3, t'=0.3$ ms, t' 对应回波周期中的位置为 $m'=ft'=6000$ 。



图3 算法流程

Fig.3 Arithmetic flow

4.1 回波信号模拟

回波信号包括目标反射的激光信号和背景噪声。由于单光子探测器不具有光子数分辨能力, 在一个探测周期内探测器若同时接收到目标反射光子和噪声光子, 只能输出一个计数脉冲而不会进行叠加。因此, 在信号模拟时, 可以分别得出目标反射信号序列和背景噪声序列, 两序列进行或运算即能得到回波信号。

使用一个 $[N+5, N_0]$ 维的矩阵来表示回波数据, 坐标为 (i, j) 的数据表示第 i 个周期的第 j 个回波信号。目标反射信号序列和噪声序列使用相同的数据格式。

4.1.1 目标反射信号模拟

使用扩展伪随机序列对激光发射进行调制, 只有调制码元为“1”时激光源发射激光, 经过 $t=nT+t'$ 后到达探测器。目标反射序列中延迟 $n=3$ 个周期后位置 m' 的值与调制信号一一对应。其他时刻无目标反射激光信号, 使用“0”来模拟。

进行调制的扩展伪随机序列 $f(x)$ 的长度为 N 。目标反射信号矩阵中, 第 m' 列按照序列 $\{0, 0, 0, f(x), 0, 0\}$ 依次赋值, 其他列的值全为“0”。

4.1.2 噪声模拟

背景噪声是随机分布的白噪声, 在全部测距过程中均存在, 强度以任一探测周期输出光电流的概率表示, 则可使用“1”所占比例不同的扩展伪随机序列模拟噪声。代表性地取6个噪声强度, “1”所占的比例分别为0、1/8、1/4、1/2、3/4和7/8。其中0表示不存在噪声的理想测距环境, 其他值涵盖了较大的噪声变化范围。由第2节可知, 使用3列 m 序列来构造噪声序列。

单次测距中, 全部回波序列长度为 $(N+5)*N_0=4.5 \times 10^5$, 则不出现重复序列时要求 m 序列阶数至少为 $n = \lceil \lg(4.5 \times 10^5 + 1) \rceil = 19$, m 序列级数分别为19、20和21。按照表1所示的运算方式产生各个强度的噪声序列, 依次放在噪声矩阵中。

4.2 光子叠加计数

光子叠加计数中, 需要将各列回波信号中记录时刻相同的值进行累加, 即将回波信号矩阵中同一列的数据进行叠加, 保存到一个长度为 N_0 的一维数组中。

由于目标反射光子总是出现在时刻 t' , 而噪声光子随机分布, 故叠加后位置 m' 处光子数取到较大值, 从而甄别出 m' 位置。仿真中取叠加值最大的时刻作为目标反射光子到达探测器的不模糊时间 t' 。

4.3 相关解调

若通过光子叠加计数正确筛选出目标反射光子到达探测器的不模糊时间 t' , 选取回波信号矩阵中第 m'

列的 $N+5$ (即 45) 个数据按次序构成序列 $g(x)$ 。 $g(x)$ 可看作目标反射的激光信号 $g'(x)$ 与噪声两部分的叠加。信号 $g'(x)$ 等同于延迟 $n=3$ 个周期后的激光发射信号 $f(x)$, 即

$$g'(x) = \{0, 0, 0, f(x), 0, 0\}. \quad (6)$$

将 $g(x)$ 与 $f(x)$ 进行相关运算, 计算式为

$$f_{\text{cor}}(f, g, x) = \sum_{i=0}^{45-x} (-1)^{g(x)+f(x+i)}, x = 0, 1, \dots, 5. \quad (7)$$

由于 $g'(x)$ 与 $f(x)$ 相差 3 个时刻, 在噪声较弱, 即噪声序列中“1”所占比例较小时, $f_{\text{cor}}(f, g, x)$ 在 $x=3$ 处可取得最大的相关值, 且 $f(x)$ 随机性越好时, $x=3$ 处的相关值越突出。因此, 相关值最大的位置作为发射激光与接收到回波信号间的周期差 n 。

4.4 $f(x)$ 中“1”所占比例对测距的影响

调制序列 $f(x)$ 中“1”的比例为 p 时, 实际发射激光脉冲和进行叠加的有效回波数目为 Np , 而噪声被叠加了 $N+5$ 次。此时叠加后信噪比为叠加前的 $pN/\sqrt{N+5}$ 倍^[11], 因此 p 的大小影响信噪比和不模糊时间 t' 的正确性。

使用 $f(x)$ 调制激光发射脉冲时, 码元“0”表示不发射激光脉冲, 经过时间 t , 探测器可能接收到噪声光子而记录为“1”, 而 $f(x)$ 中的码元“1”总被正确记录。 $f(x)$ 中“0”的数目越多, t' 时刻记录的信号出错的可能性越大, 即 p 影响序列 $g(x)$ 的正确性。由第 2 节可知, p 影响 $f(x)$ 的随机性, 将 $f(x)$ 与 $g(x)$ 进行解调得到周期差 n 。因此, p 通过影响 $g(x)$ 的正确性和 $f(x)$ 的随机性从而影响周期差 n 的正确获得。

根据以上分析, 在 $p < 1/2$ 情况下, 叠加后信噪比提高程度小, 易受噪声光子干扰, 因此本文只分析 $p \geq 1/2$ 的序列 $f(x)$ 的调制测距能力。代表性地选取 $p=1, 1/2$ 和 $7/8$ 的扩展伪随机序列进行算法仿真。

4.5 测距仿真结果

使用“1”所占比例为 p 的扩展伪随机序列进行调制测距, 分别计算得到不同强度噪声干扰下的光子叠加直方图和最大叠加值分布表, 以及相关值分布图。仿真中已设定 $m'=6000, n=3$ 。

1) $p=1$: $f(x)$ 为不具有随机性的全“1”序列, 即激光源正常发射, 无调制。此时可得图 4 所示的光子叠加直方图、图 5 所示的相关函数分布图和表 3 所示的最大叠加值分布。

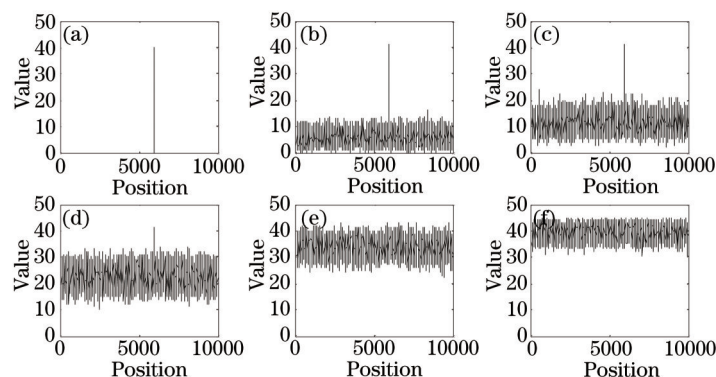


图 4 不同噪声下光子叠加直方图 ($p=1$)。 (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

Fig.4 Photons histograms under different noises ($p=1$). (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

表 3 最大叠加值分布 ($p=1$)

Table 3 Distribution of the biggest added values ($p=1$)

Noise	0	1/8	1/4	1/2	3/4	7/8
Value	40	40	42	42	44	45
Position	6000	6000	6000	6000	6000	267

2) $p=1/2$: 在 6 阶 m 序列中截取长度为 40 的一段作为调制序列 $f(x)$, 其中包含 20 个“1”。此时可得图 6 所示的光子叠加直方图、图 7 所示相关函数分布和表 4 所示最大叠加值分布。

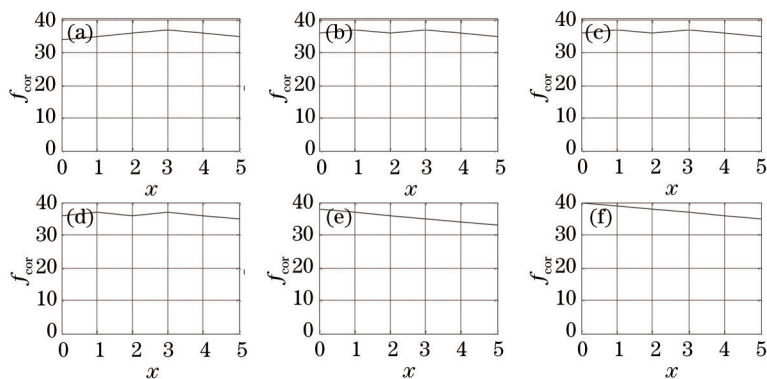


图5 不同噪声下相关函数分布图($p=1$)。 (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

Fig.5 Distributions of correlation under different noises ($p=1$). (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

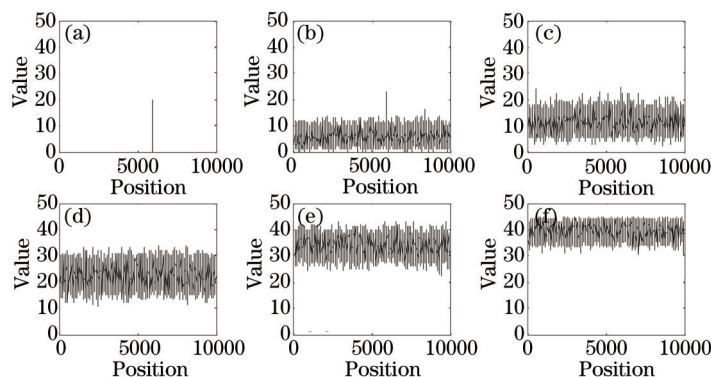


图6 不同噪声下光子叠加直方图($p=1/2$)。 (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

Fig.6 Photons histograms under different noises ($p=1/2$). (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

表4 最大叠加值分布($p=1/2$)

Table 4 Distributions of the biggest added values ($p=1/2$)

Noise	0	1/8	1/4	1/2	3/4	7/8
Value	20	23	26	36	41	43
Position	6000	6000	6000	6322	1966	267

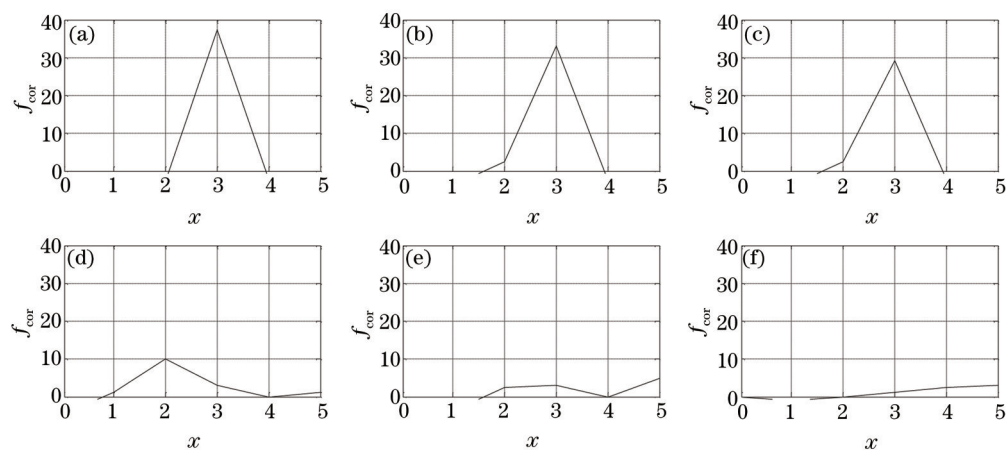


图7 不同噪声下相关函数分布图($p=1/2$)。 (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

Fig.7 Distributions of correlation under different noises($p=1/2$). (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

3) $p=7/8$: 根据表1中计算方式得到“1”所占比例为7/8的扩展伪随机序列作为 $f(x)$ 对激光发射进行调制, 序列长度40其中包含35个“1”。此时可得图8所示的光子叠加直方图、图9所示的相关函数分布和表5所示的最大叠加值分布。

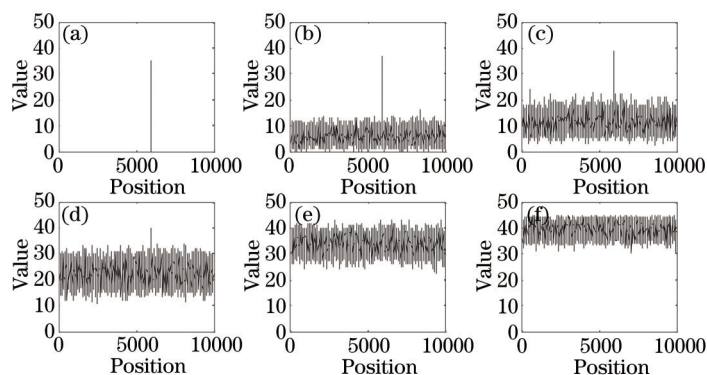


图 8 不同噪声下光子叠加直方图($p=7/8$)。 (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

Fig.8 Photons histograms under different noises ($p=7/8$). (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

表 5 最大叠加值分布($p=7/8$)

Table 5 Distribution of the biggest added values ($p=7/8$)

Noise	0	1/8	1/4	1/2	3/4	7/8
Value	35	35	37	39	43	45
Position	6000	6000	6000	6000	1966	267

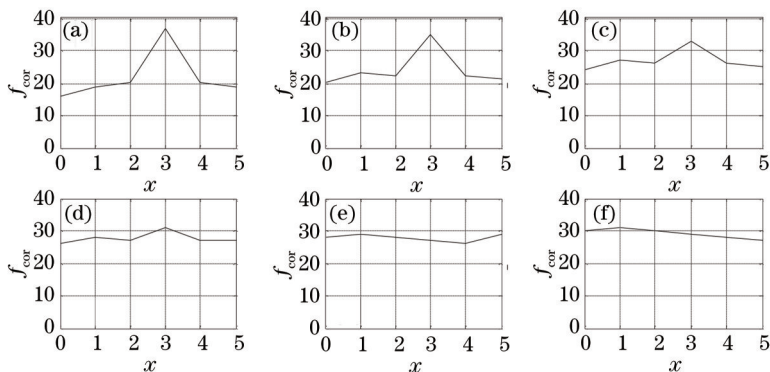


图 9 不同噪声下相关函数分布图($p=7/8$)。 (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

Fig.9 Distributions of correlation under different noises ($p=7/8$). (a) 0; (b) 1/8; (c) 1/4; (d) 1/2; (e) 3/4; (f) 7/8

对比图 4、6 和 8 以及表 3、4 和 5 可知,在同等强度噪声作用下,调制序列中“1”所占的比例 p 越大,叠加后的信噪比越大, m' 位置的提取能力越强。

由图 5、7 和 9 知, $p=1$ 的序列无随机性,互相关函数趋于平稳,在噪声强度不大于 $3/4$ 时,即使提取到位置正确的 $g(x)$ 序列,相关解调仍很难得到正确的周期差 n 。 $p=1/2$ 的序列具有最好的相关性,弱噪声时互相关函数具有明显的峰值,最大值和次大值相差接近 40;噪声强度超过 $1/4$ 时,由于 m' 值错误、未能提取到正确的 $g(x)$,相关解调不能得到正确的周期差 n 。 $p=7/8$ 时,调制序列具有一定的随机性和较好的抗噪声能力,在噪声强度达到 $1/2$ 时仍可得到正确的 m' ,且相关函数在 $x=3$ 处有较突出的峰值,即能得到正确的周期差 n 。

由以上分析知, $p=7/8$ 的扩展伪随机序列具有比全“1”序列更好的随机性,用于调制测距时得到比 m 序列更大的叠加信噪比和更好的抗干扰能力。在测距仿真中,得到了优于另两种序列的测距结果。

5 结 论

本文基于单光子计数和调制测距原理,设计了一种可消除距离模糊的测距技术。使用扩展伪随机码调制激光发射,采用分步计算的方法可减少调制序列长度,解调运算量小,效率高。扩展伪随机序列中“1”所占比例 p 会影响到光子叠加计数的信噪比、信号的抗噪声能力和相关解调能力等,对测距能力具有重要影响。算法仿真证明,该测距技术在一定的噪声干扰下可以成功实现测距。另外可知,相比全“1”序列和 m 序列,使用 $p=7/8$ 的序列进行调制测距可得到更好的测距效果。本文研究内容可为后续相关研究提供参考。

- 1 Pan Qiujuan, Fang Qinghai, Yang Yan. Key technique and its progress in satellite laser ranging at high repetition rate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(7): 33-39.
潘秋娟, 房庆海, 杨 艳. 高重复率卫星激光测距的关键技术及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(7): 33-39.
- 2 Tang Rufeng, Li Yuqiang, Li Xi, *et al.*. Spin rate determination of AJISAI based on high frequency satellite laser ranging[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608010.
汤儒峰, 李语强, 李 熙, 等. 基于高重频卫星激光测距推算 AJISAI 卫星自转速率[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608010.
- 3 Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al.*. kHz repetition satellite laser ranging system with high precision and measuring results [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(15): 1177-1183.
张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 高精度千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果[J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1177-1183.
- 4 Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002.
郑向明, 李祝莲, 伏红林, 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002.
- 5 Zhai Dongsheng, Tang Rufeng, Huang Kai, *et al.*. Analysis on detection performance of satellite laser ranging based on Geiger mode APD arrays[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608007.
翟东升, 汤儒峰, 黄 凯, 等. 基于 G-APD 阵列的卫星激光测距系统探测性能分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608007.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Zhang Chunfeng, Yang Yi, Liu Chunhua. A multi-pulse based signal processing algorithm for airborne long-distance laser ranging[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(12): 29-33.
张春风, 羊 毅, 刘春华. 基于多脉冲的机载远程激光测距信号处理算法[J]. 电光与控制, 2010, 17(12): 29-33.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 Zheng Gongming. Module design of m -sequence code based on Avalon bus[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2011, 30(1): 78-81.
郑恭明. 基于 Avalon 总线的 m 序列码组件设计[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2011, 30(1): 78-81.
- 16 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.
- 17 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.

栏目编辑: 张浩佳