

# 高噪声高精度时间相关单光子测距系统性能研究

沈姗姗<sup>1,2,3</sup> 陈钱<sup>1,2</sup> 曹芳<sup>3</sup> 何伟基<sup>1,2</sup> 顾国华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

<sup>2</sup>南京理工大学江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094

<sup>3</sup>南京理工大学紫金学院, 江苏 南京 210046

**摘要** 为弥补伪随机码调幅测距系统性能研究的不足,采用可编程逻辑器件实现 1 GHz 和 2.5 GHz 速率的伪随机码发生器。实验系统以 50 m 为测试距离,针对两路伪随机码光子到达时间点,采用快速傅里叶变换算法得到互相关波形。在此基础上,建立互相关波形的数学模型,采用参数估计法,运用马尔可夫技术完成参数迭代,重构距离波形,得到距离估计值。实验结果表明,伪随机码为 1 的比例为 1%,探测到的光子计数率为  $2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ;低背景噪声下,积分时间和信噪比成正比,与理论相符;高背景噪声下,随着积分时间的增大,采用该方法估计的距离值标准差比峰值距离标准差的增大速度缓慢,整体距离精度高于峰值距离精度。积分时间为 0.001 s 时,2.5 GHz 码速测距的精度从 7.3 cm 提高到 4.62 cm。另外,该方法估计得到的 1 GHz 的距离精度仍然低于 2.5 GHz 的距离精度,同等速率下,可降低噪声对距离精度的影响。

**关键词** 探测器;单光子;精度;伪随机码;马尔可夫技术

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0604001

## Research on Performance of Single Photon Counting Ranging System with High Background Noise and High Resolution

Shen Shanshan<sup>1,2,3</sup> Chen Qian<sup>1,2</sup> Cao Fang<sup>3</sup> He Weiji<sup>1,2</sup> Gu Guohua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

<sup>2</sup>*Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligence Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

<sup>3</sup>*Zijin College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210046, China*

**Abstract** In order to compensate the shortness of the pseudorandom ranging system performance research, pseudorandom generator of 1 GHz and 2.5 GHz is realized by field-programmable gate array. Using 50 m as tested range, two channel photons arriving times are measured and calculated by fast Fourier transformation to obtain cross-correlation wave. Based on that, the cross-correlation mathematic model is set up and the parameter evaluation method is used, Markov technique is utilized to optimize parameter iteration. Finally, the cross-correlation wave is reconstructed and the range evaluation value is obtained. The ratio of pseudorandom pattern of 1 is 1% and the detected photon counting rate is  $2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ . The research result manifests that in low background condition, with the increased integration time, the signal to noise ratio increases, which agrees with the theory result. In high background condition, with the increased integration time, the deviation amplifying speed with direct

收稿日期: 2015-11-10; 收到修改稿日期: 2016-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(61101196,61271332)、中央高校基本科研业务费专项资金(30920140112012)、江苏省普通高校研究生科研创新(实践)计划项目(KYLX15\_0368)

作者简介: 沈姗姗(1985—),女,博士研究生,讲师,主要从事激光雷达三维成像方面的研究。

E-mail: 213104000042@njust.edu.cn

导师简介: 陈钱(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测与图像处理方面的研究。

E-mail: chenq@mail.njust.edu.cn

peak value is greater than the speed with the proposed method. Compared to the peak value method, the whole resolution is improved. With the integration time of 0.001 s, the resolution is increased from 7.3 cm to 4.62 cm. In addition, the resolution of 1 GHz is much lower than the resolution of 2.5 GHz. At the same bit speed, the effect of background noise on resolution is weakened.

**Key words** detectors; single photon; resolution; pseudorandom; Markov technique

**OCIS codes** 120.0280; 030.6600; 040.1345

## 1 引 言

近几年,在高度计的研究中,研究人员采用伪随机码序列对激光强度进行调制,经铟砷化镓光子探测器将离散光子信号转换为离散电脉冲信号输出,然后经单光子计数器甄别后的码元序列与原始伪随机码做互相关运算,最终得到距离值<sup>[1-5]</sup>。另外,时间相关单光子计数(TCSPC)的伪随机码调幅激光三维深度成像系统的研究<sup>[6-7]</sup>在国外也有多方面报道。例如,Hiskett等<sup>[6]</sup>以1 GHz的伪随机码发生器调制垂直表面激光器,以所测得的系统抖动波形为模板,运用“粗细精度提取法”实现了10 cm的距离分辨率;Krichel等<sup>[7]</sup>运用上兆赫兹的伪随机码发生器驱动激光器发送激光脉冲,不同码长下,比较研究探测概率与最大测量距离之间的关系,并获得高速三维成像。该类系统的信噪比(SNR)、精度等也是近几年国内研究的重点。沈姗姗等<sup>[8]</sup>提出非线性的信噪比模型,研究伪随机码测距性能;杨芳等<sup>[5]</sup>的实验研究发现,M序列较A1序列、A2序列、GOLD序列等有更好的信噪比和测距精度。

然而,该类系统距离的获取主要建立在互相关算法<sup>[1-8]</sup>基础上,多提取峰值为距离值,或者用“质心拟合算法”计算距离值<sup>[1-5]</sup>。大多数实验在晚上进行<sup>[5]</sup>,背景噪声几乎可以忽略不计。实际测量过程中,高背景噪声使得互相关噪声值增大<sup>[6]</sup>,信噪比降低。已有研究指出较高的信噪比可以得到较好的测距精度<sup>[1,3]</sup>,然而在高噪声或低信噪比下,距离精度的改进未被广泛研究。其次,与伪随机码调制连续波雷达技术<sup>[9-11]</sup>比较,时间相关单光子计数技术的伪随机码调制雷达系统的成本较高,并且码型的灵活性受到价格昂贵的伪随机码发生器的限制,从而使该类系统无法得到广泛应用。

基于此,为了进一步研究该类系统的性能,找到提高距离精度的方法,本文设计基于可编程逻辑器件的伪随机码发送模块,分别以1 GHz和2.5 GHz的速率调制激光器,发出的光脉冲被两路探测器接收。基于积分时间和信噪比的理论公式,分别研究低背景噪声和高背景噪声下积分时间和信噪比的关系。在背景噪声几乎可忽略不计的情况下,暗计数在 $200\text{ s}^{-1}$ 左右,积分时间和信噪比成正比。引入高背景噪声,使得(探测到的背景噪声光子数和信号噪声光子数之比大于0.28),积分时间的延长不能提高信噪比,距离精度降低。建立互相关波形模型,采用马尔可夫技术对互相关波形进行重构,高背景噪声的距离精度得到提高,积分时间为0.001 s,背景噪声为 $800000\text{ s}^{-1}$ ,2.5 GHz距离精度可达4.62 cm。尽管2.5 GHz速率测距精度要高于1 GHz速率测距精度,且采用该方法不能改变不同码速或者分辨率对距离精度的影响,但是可以降低不同高背景噪声对距离精度的影响程度。

## 2 实验装置与算法原理

### 2.1 实验装置

实验原理如图1所示,图中黑色线为电气连接线,箭头线为光路连接线。设计完成的伪随机码发生器发送高速伪随机码电流型逻辑电平(CML),触发垂直表面激光器(VCSEL)发光,码为1时发光,码为0时不发光。利用工作在盖革模式下的单光子计数器作为光电探测器(SPAD),时间到达记录仪记录码为1时的光子到达时间点,1分2分路器分别发送两路码型,一路是参考码,一路是经过延时后的接收码,光纤衰减器用于减弱激光器信号以避免单光子探测器遭受过强光的损坏,同时也用于调整两路接收的光子数基本一致。激光器和多模光纤用于发送和传播850 nm波段光波。耦合器用于加入850 nm光源噪声。

考虑 $n$ 次叠加后,可得<sup>[8]</sup>

$$O_{\text{SNR}} = \frac{n^2 \eta_s^2 R_a N C_s^2}{n \eta_s C_s + \eta_n C_n} = \frac{n^2 P_{1s}^2 [1 - \exp(-m_s)]^2 R_a N}{n P_{1s} [1 - \exp(-m_s)] + P_{1n} [1 - \exp(-m_n)]} \quad (1)$$

噪声功率远小于信号功率或者近似为0,输出信噪比呈 $n$ 倍增长<sup>[2]</sup>。在死时间、激光发射功率、码长等不变

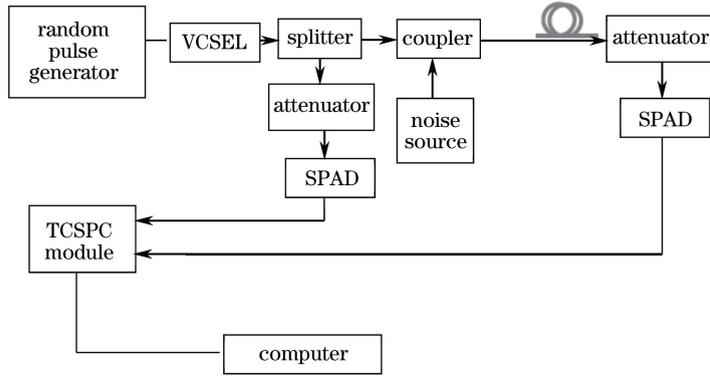


图 1 实验原理图

Fig. 1 Experiment principle chart

的情况下,叠加次数即积分时间与系统输出的信噪比成正比。

### 2.2 采用马尔可夫技术的波形重构

首先建立互相关波形数学模型<sup>[12]</sup>:  $\Lambda(n, \beta_j, T_{d_j})$  表示标记为  $j$  的距离上互相关的光子数在光子时间  $n$  上的分布,对距离分布未知的互相关信号为  $w(n)$ ,

$$\Lambda(n - t_d) = \beta [1 - (L + 1) \times |n - t_d| / (T_c \times L)], \quad (2)$$

$$\Lambda(n - t_d) = \beta \exp[-(n - t_d)^2], \quad (3)$$

$$w(n) = \sum_{j=1}^k \Lambda(n, \beta_j, t_{d_j}) + N. \quad (4)$$

式中  $N$  表示噪声,  $k$  表示距离的个数。  $t_{d_j}$  表示第  $j$  个信号  $\Lambda(n, \beta_j, T_{d_j})$  的峰值位置,  $\beta_j$  表示第  $j$  个互相关信号  $\Lambda(n, \beta_j, t_{d_j})$  的峰值幅度,  $t_d$  和  $\beta$  是  $k$  维向量。

基于贝叶斯理论的马尔可夫方法在单光子固定周期的多脉冲累积测距系统中的应用已有一定研究。其主要解决的问题是在高背景噪声或者探测次数不足的情况下,改进距离提取的精度<sup>[13-14]</sup>。本文采用该方法,结合马尔可夫技术的 Metropolis 策略完成参数的更新。探测到的数据  $y$  包括信号光子数和噪声光子数,并假设光子数服从泊松分布<sup>[2,8-9]</sup>。将  $y$  看成是服从以  $w(i)$  为参量的泊松分布<sup>[13-14]</sup>,

$$P[y_i | w(i)] = \exp[-w(i)] \frac{w(i)^{y_i}}{y_i!}, \quad (5)$$

$$L(y | t_d, k=1, \beta, N) = \prod_{i=1}^{i_{\max}} \exp[-w(i)] \frac{w(i)^{y_i}}{y_i!}. \quad (6)$$

式中,先验分布的选取如下:设定峰值数  $k$  为 1,幅度参量  $\beta$  和噪声  $N$  均服从 Gamma 分布,  $t_d$  服从均匀分布<sup>[13-15,17]</sup>。多次测量的联合分布概率可以写为<sup>[13-15,17]</sup>

$$f(t_d, \beta, N) = \left( \frac{1}{i_{\max}} \right) f_G(N | C, D) f_G(\beta_n | A, B), \quad (7)$$

式中  $f_G$  表示一个 Gamma 分布概率分布密度函数,  $A$  和  $C$  是 Gamma 分布的尺度参量,  $B$  和  $D$  是 Gamma 分布的形状参量。由此可得在后验信息  $y$  下的先验分布概率密度函数<sup>[13-15,17]</sup>

$$\pi(t_d, \beta, N | y) = \frac{L(y | t_d, \beta, N) f(t_d, \beta, N)}{\int L(y | t_d, \beta, N) f(t_d, \beta, N) d(t_d, \beta, N)}. \quad (8)$$

## 3 实验结果

### 3.1 比特流发生器

将 Matlab 生成的伪随机码.coe 文件存入现场可编程门阵列(FPGA)双口 RAM,从中读出数据,通过 ROCKET IO 发送序列码。ROCKET IO 是 Xilinx 系列 FPGA 的 GTX IP 核,该 IP 核与 SFP 光模块相连接,用于高速信息的发送和接收。本设计不调用 ML507 平台的光模块,直接发送 CML 差分信号,以驱动垂

直表面激光器发射光脉冲。根据开发手册调用 ROCKET IO 和 RAM 核,选用合适的 125 MHz 以及 16 位数据位宽,研究地址和数据的正确映射,保证 RAM 读出的数据速率和 ROCKET IO 发送的数据速率一致。采用 NI 9185 测试伪随机码发送器的关键指标——速率,该板卡可采集的最大采样速率达 10 GHz。

基于 NI 5185 板卡的码速率测试结果如图 2 所示。分别发送 1 GHz 和 2.5 GHz 脉冲串,测量得到码宽约为 1 ns 和 457 ps,分别如图 2(a)、(b)所示,码速可达 1 GHz 和 2.5 GHz。由于脉冲上升时间、下降时间以及该示波器界面测量时间的精度有限,测量的数据和实际值有一定误差。

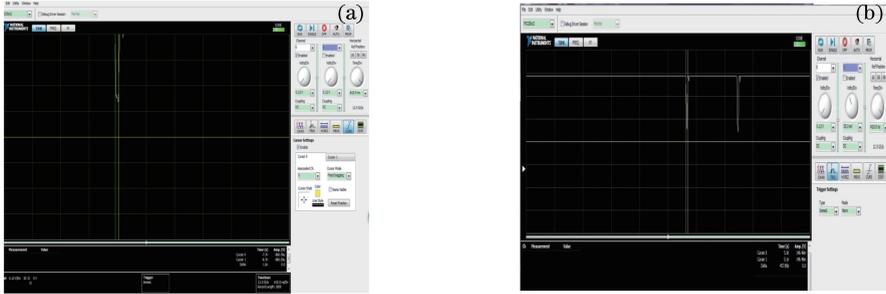


图 2 NI 示波器码速测量。(a) 1 GHz; (b) 2.5 GHz

Fig. 2 NI oscilloscope bitstream speed measurement. (a) 1 GHz; (b) 2.5 GHz

### 3.2 互相关波形获取及距离估计

该实验在场内正常光照下完成,以长度为 50 m 的光纤为测试距离,外部噪声光源关闭。搭建的系统包括:设计完成的 1 GHz 和 2.5 GHz 速率的伪随机码发生器,ADI 公司的垂直表面激光器,时间相关时间记录仪器,雪崩二极管,计算机,1 分 2 分路器,光衰减器,如图 1 所示。其中系统死时间为 50 ns,测量得到系统的暗计数在  $200 \text{ s}^{-1}$ 。TCSPC 工作在 T2 模式,最小探测时间为 1 s。通道 0 为发送码型光子到达时间点,通道 1 为经过延时后的接收码型光子到达时间点。垂直表面激光器 Mset 口电压用以调整激光发射功率,Bset 口用于调节激光器消光比。激光器上电,开始发送码后,调整光衰减器,使得两路信号的计数率相差不到 5%,以避免堆积效应,两路探测到的光子计数率为  $2.1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  左右。由于死时间的存在,码的比例过大会导致多个 1 无法探测到,从而降低探测概率<sup>[8]</sup>。本实验所发射的伪随机码为 1 的比例大约在 1%,用测量

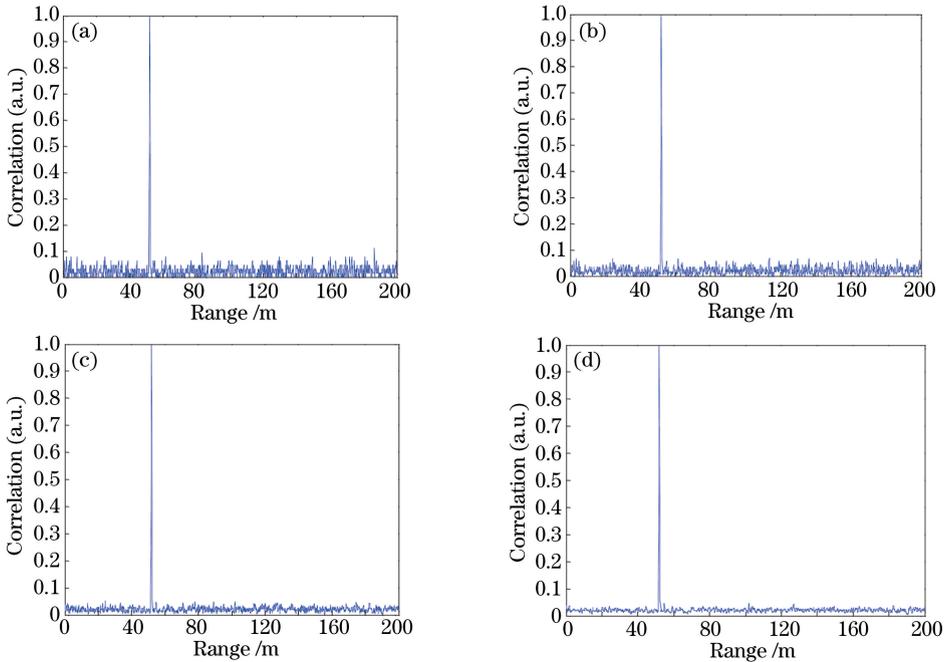


图 3 不同积分时间下 1 GHz 码速互相关结果。(a) 0.0005 s; (b) 0.001 s; (c) 0.005 s; (d) 0.05 s

Fig. 3 Cross-correlation results at 1 GHz with different integration times.

(a) 0.0005 s; (b) 0.001 s; (c) 0.005 s; (d) 0.05 s

得到的 EXCEL 文件中的时间到达点重构出两路序列码型,互相关结果分别如图 3 和图 4 所示。

由图 3 和图 4 可见,两种码速的互相关信噪比均随积分时间的增加而增大,与(1)式相符。积分时间相同,码速高的互相关信噪比比码速低的信噪比低,原因是该系统约有 400 ps 的抖动,2.5 GHz 码速与 1 GHz 码速相比,400 ps 的码宽发生误码的概率大,信噪比降低<sup>[6,8]</sup>。由于系统抖动带来的误码增加,因此在相邻单位有较高的互相关度,表现为 2.5 GHz 码速的互相关波形相较 1 GHz 码速的互相关波形有一定展宽。以上实验结果与前期工作的理论研究结果相符<sup>[8]</sup>。

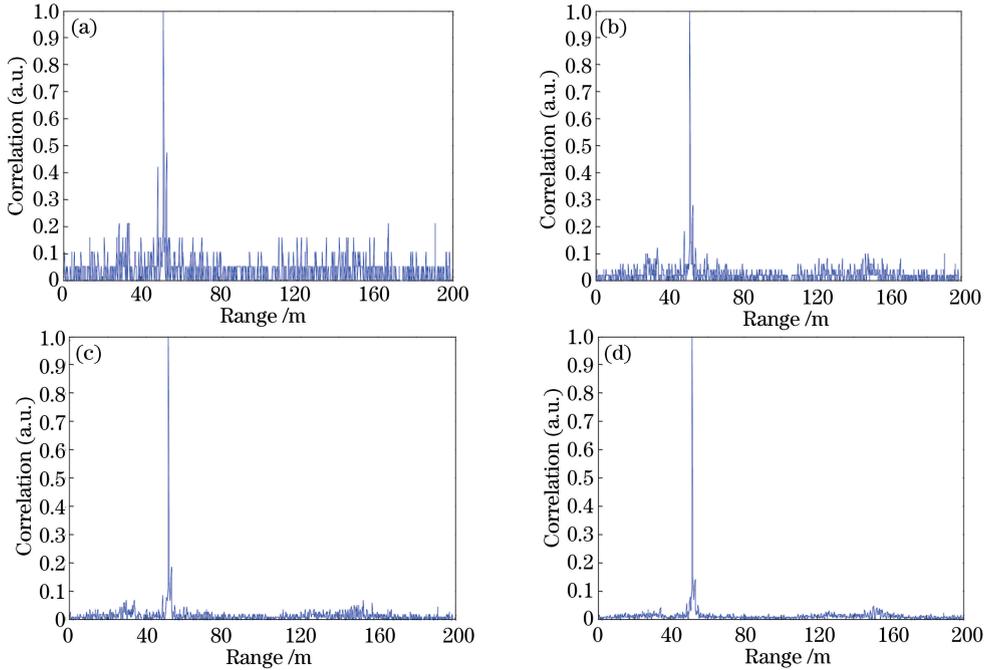


图 4 不同积分时间下 2.5 GHz 码速互相关结果。(a) 0.0005 s; (b) 0.001 s; (c) 0.005 s; (d) 0.05 s

Fig. 4 Cross-correlation results at 2.5 GHz with different integration times.

(a) 0.0005 s; (b) 0.001 s; (c) 0.005 s; (d) 0.05 s

保持所发送的参考码型不变,光分路器一端加入 850 nm 的光波噪声,噪声计数率为  $800000 \text{ s}^{-1}$ ,采用 2.5 GHz 的速率调制垂直表面激光器,得到互相关波形如图 5 所示。图 5 显示随着积分时间的增大,信噪比没有提升反而降低,原因是虽然加大积分时间可获得更多的信号能量,但噪声能量也累积增大,信噪比不但没有得到改善,甚至会出现多个相近的峰值,如图 6(c)、(d) 所示。图 5 给出仿真研究中不同噪声信号计数比下,系统信噪比的变化,仿真过程及原理见文献<sup>[8]</sup>。可见,在 0.0001~0.004 s 范围内,探测到的噪声光子计数和信号光子数之比大于 1/3,信噪比随积分时间呈下降趋势,相同比例下,如  $C_s/C_n=1-1$ ,  $C_s/C_n=2-2$ , 虽然比例均为 1,但是后者信号和噪声强度是前者的 2 倍,总体信噪比大小改变,变化趋势不变。实验研究发现,探测到的噪声光子计数和信号光子计数值大于 0.28,即探测到的总光子数为  $2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ,信号光子

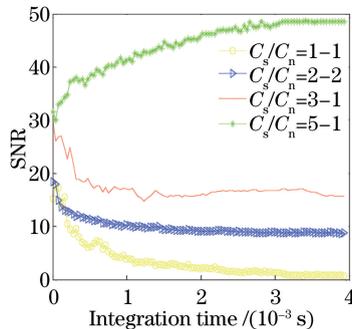


图 5 计数率与信噪比关系图

Fig. 5 Relationship between count rate and SNR

数约为  $1.6 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ , 噪声光子数约为  $4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ , 积分时间使信噪比性能降低。存在误差的原因是: 仿真没有考虑系统的抖动带来的位移偏差<sup>[16]</sup>, 虽然仿真中引入了死时间, 但实际系统的死时间并不固定, 也会导致光子时间到达点的误判。

假设噪声初始值为 3,  $t_d$  初始值为  $\max(y)$  所在的时间位置;  $\beta$  初始值设置为  $\max(y)$ 。A、C 分别为 6 和 1.5, D、F 分别为  $\frac{\max(y)}{12}$  和  $\text{mean}(y)$ , 所有参量的更新次数为 2000, 距离估计如图 6 所示。改变噪声初始值, 不影响距离值的估计结果。同一积分时间下, 波形的幅度估计值有差别。并且图 6(b)、(c) 中, 积分时间长的幅度估计值反而低于积分时间短的幅度估计值, 该幅度值的估计有一定的不准确性。图 6(a) 中距离估计值和原有距离峰值相差不大, 积分时间增大, 信噪比降低, 差异明显。表明噪声累积越强, 所得到的波形距离值与真实值之间偏差越大, 因此有必要对该距离值进行估计, 提高距离精确度。

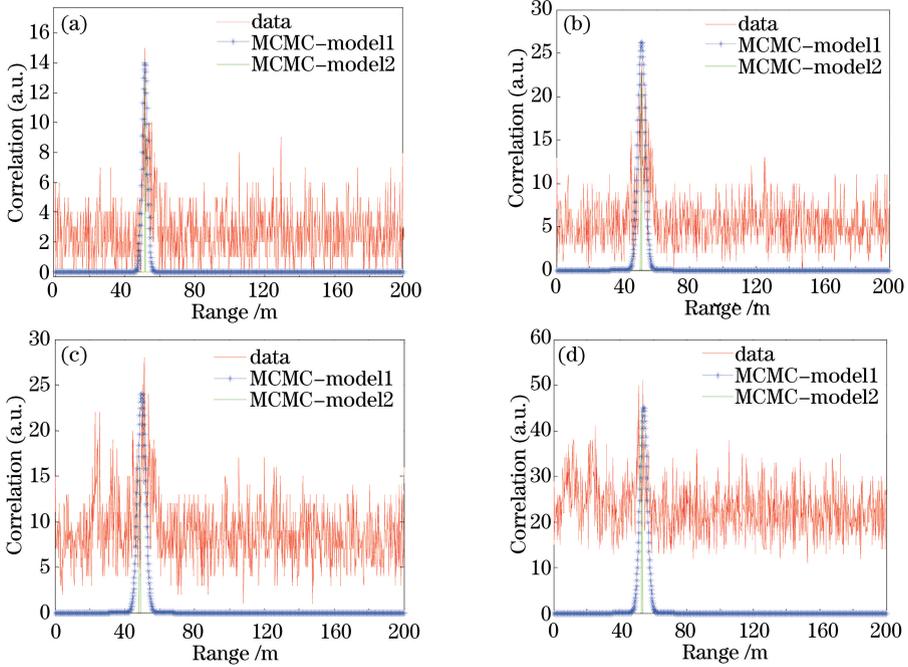


图 6 不同积分时间下原始数据和距离值估计。(a) 0.0005 s; (b) 0.001 s; (c) 0.005 s; (d) 0.05 s

Fig. 6 Original data and range evaluation with different integration times.

(a) 0.0005 s; (b) 0.001 s; (c) 0.005 s; (d) 0.05 s

为了评估距离估计性能, 固定积分时间为 0.001 s, 得到 1 GHz 的峰值距离值和估计值, 结果如图 7 所示。不加噪声的距离值浮动明显小于加入噪声后的距离值浮动。加入  $800000 \text{ s}^{-1}$  高噪声后, 采用该方法可降低距离值的浮动。此外, 不加噪声的距离标准差为 12.7 cm, 其距离浮动以分辨率 20 cm 为基本单位, 而采用该方法的距离浮动单位不受距离分辨率的限制, 其距离标准差约为 8.1 cm, 并且距离的平均值更接近真实距离值, 约为 51 m。为了研究积分时间对信噪比和距离精度的影响, 计算不同积分时间下 2.5 GHz 速率时的距离精度值, 结果如图 8 所示。在 0.001~0.1 s 范围内均匀取 10 个积分时间, 分别计算 50 组实验值标准差。不加背景噪声, 暗计数约为  $200 \text{ s}^{-1}$ , 标准差随积分时间的增大而降低, 这是由于积分时间的增加使得信噪比增大, 信噪比越高距离精度越高。加入噪声后, 距离精度值随积分时间的增大而降低, 标准差增大。在积分时间增大到约 0.06 s 后, 噪声的累积对信噪比和距离的浮动影响加大, 这是由于积分时间增大使得信噪比降低, 峰值浮动加大, 甚至产生峰值误判。MCMC 方法的两个波形模型的估计结果没有太大区别, 原因是所采用的一维马尔可夫链可以直接估计出时间到达点, 时间到达点的更新与否取决于马尔可夫链的转移概率, 且决定最终估计得到的时间到达点的数值。 $t_d$  转移概率的计算, 即马尔可夫链从状态  $X_i$  转移到状态  $X_{j+1}$  的概率为

$$\alpha_1(t_d, t'_d) = \frac{L(y | t'_d, k=1, \beta, N) q_N(t'_d | t_0, \sigma_1)}{L(y | t_d, k=1, \beta, N) q_N(t_d | t_0, \sigma_1)}, \quad (9)$$

式中  $q_N$  为  $t_d$  的更新概率密度, 设为高斯分布<sup>[17]</sup>, 转移概率大于 1 则更新, 其中似然函数  $L(y | t'_0, k, \beta, B)$ 、 $L(y | t_0, k, \beta, B)$  和所建立的模型有关, 两个数学模型的分布规律相似, 相似的数学模型的比值降低了不同模型之间转移概率的计算值差别, 并且不同模型下  $t_d$  的更新概率密度都属于高斯分布, 并且方差一致<sup>[13]</sup>,  $\sigma_1 = 0.3$ , 即使出现更新, 可以推断最终估计值的方差相差不大。

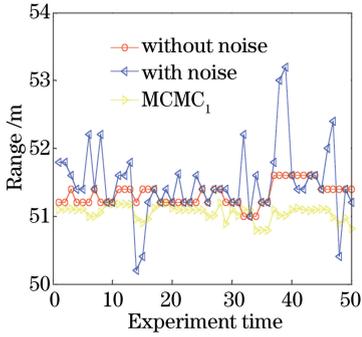


图 7 1 GHz 实验数据

Fig. 7 Experimental data at 1 GHz

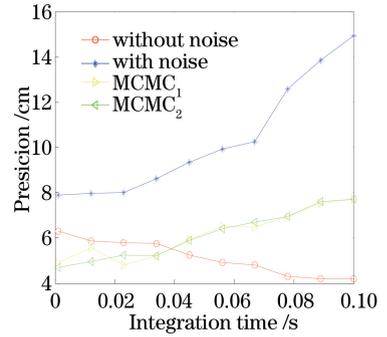


图 8 精度比较

Fig. 8 Resolution comparison

该距离估计方法得到的距离标准差仍随积分时间的增大而增大, 但较峰值法的变化幅度小, 变化趋势平缓。总体标准差要小于峰值法的距离标准差, 该距离估计方法对距离精度的改善有一定优势。统计了 2.5 GHz 速率时, 三种背景噪声下采用模型 1 估计的精度随积分时间的变化关系, 如图 9 所示。可以看到, 噪声越大, 所估计的距离精度性能越差。由于系统内部缓存空间有限, 光子计数率超过  $2200000 \text{ s}^{-1}$ , 则会产生溢出而使得数据不正常缺失, 所取噪声最大值有限。探测到的信号噪声比值小于  $1/4$ , 噪声光子数小于  $330000 \text{ s}^{-1}$ , 积分时间增加, 信噪比和精度值基本不变, 甚至性能略有提升, 采用该方法估计距离值优势不明显。

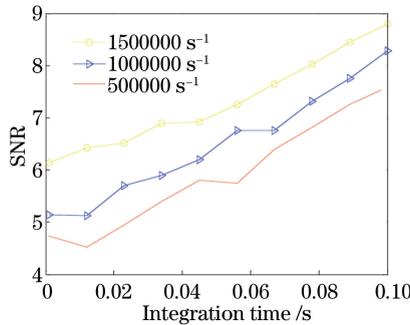


图 9 不同背景噪声比较

Fig. 9 Comparison of different background noises

表 1、表 2 计算了两种速率在噪声分别为  $800000 \text{ s}^{-1}$  和  $1500000 \text{ s}^{-1}$ , 积分时间为 0.075 s 时的 50 组距离估计值的标准差, 距离值的分辨单元越小距离精度值越高, 2.5 GHz 距离估计值浮动小于 1 GHz 距离估计值的浮动。采用该方法估计后, 2.5 GHz 距离估计值的浮动依然小于 1 GHz 距离估计值的浮动。同种速率, 两种背景噪声下所估计的距离精度之差小于峰值法所得距离精度之差。该方法在不同背景噪声下估计的距离值较稳定。

表 1 峰值距离精度

Table 1 Peak range resolution

Bite-rate /GHz	Noise /s <sup>-1</sup>	
	800000	1500000
1	16.5 cm	19.7 cm
2.5	11.0 cm	14.2 cm

表 2 改进距离精度

Table 2 Improved range resolution

Bite-rate /GHz	Noise /s <sup>-1</sup>	
	800000	1500000
1	10.4 cm	11.9 cm
2.5	6.6 cm	7.8 cm

## 4 结 论

搭建了 2.5 GHz 伪随机码单光子调幅光纤测距系统,系统分辨率可达 8 cm。对比 1 GHz 调制系统,研究了在高噪声环境下系统的信噪比和测距精度,给出信噪比理论公式,考虑系统死时间,采用 64 kbit,1%的码比例码型,实验得到以下结论:

1) 微光环境下,积分时间增大信噪比增大,与理论公式相符合。

2) 高背景噪声下,信噪比和积分时间不成正比,增大的积分时间导致信噪比和系统精度均降低。值得注意的是,这并不意味着降低积分时间就可以确保高系统性能,过低的积分时间会导致实际样本点采样不足,无法得到互相关波形。

3) 噪声是距离精度降低的重要原因之一,采用马尔可夫技术估计距离值可提高距离精度,降低积分时间和噪声对测距精度的影响,估计的精度值要高于峰值法所得到的距离精度值。100000~300000 s<sup>-1</sup>噪声范围内,峰值法得到的信噪比和精度随积分时间的增大基本保持不变。噪声小于 100000 s<sup>-1</sup>,如背景噪声取 50000 s<sup>-1</sup>,积分时间为 0.07s 时,改进的精度 5.9 cm 小于峰值法精度 8.6 cm。积分时间 0.09 s,两者继续减小,改进的精度减小得慢,为 5.7 cm 左右,而峰值法精度为 6.7 cm。积分时间继续增大,则改进的精度 5.4 cm 大于峰值法精度 5.1 cm。本算法优势不明显。不管是高噪声还是低噪声下,不同积分时间所带来的距离精度性能的变化速度下降,但不改变原有的变化趋势,从另一个侧面印证了该算法的优势。高噪声下,总体精度性能提高,精度性能下降变慢,性能提高。低噪声下,总体精度性能也提高,但精度性能上升较峰值法变慢,在某一积分时间段性能低于峰值法精度。本文主要考虑高噪声(大于 330000 s<sup>-1</sup>)时的系统性能。

4) 高背景噪声下原有信噪比公式有一定局限,本文没有深入研究符合实验结果的公式推导。并且没有考虑大气湍流和抖动对距离精度的影响,以及估计距离值与真实距离值的差距,这些还有待后续工作的深入探讨。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, *et al.*. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 40(2): 0208001.  
杨 芳, 张 鑫, 贺 岩, 等. 基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术[J]. *光学学报*, 2013, 40(2): 0208001.
- 2 Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. Simulation of space-borne sltimeter based on pseudorandom modulation and single-photon counting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 21-26.  
杨 馥, 贺 岩, 陈卫标. 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.
- 3 Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. Study of fiber laser ranging system using pseudorandom 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.
- 4 Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, *et al.*. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3235-3238.  
杨 芳, 张 鑫, 贺 岩, 等. 采用高速伪随机码调制和光子计数技术的光纤激光测距系统[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3235-3238.
- 5 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.
- 6 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]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 13685-13698.
- 7 Krichel N J, McCarthy A, Buller G S. Resolving range ambiguity in a photon counting depth imager operating at kilometer distances[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9192-9206.
- 8 Shen Shanshan, Chen Qian, He Weiji, *et al.*. Resaerch 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.
- 9 Takeuchi N, Sugimoto N, Baba H, *et al.*. Random modulation cw lidar[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(9): 1382-1386.
- 10 Takeuchi N, Baba H, Sakurai K, *et al.*. Diode-laser random-modulation cw lidar[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(4): 63-

67.

- 11 Emery Y, Flesia C. Use of the A1-and the A2-sequences to modulate continuous-wave pseudorandom noise lidar[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(12): 2238-2241.
- 12 Yin W Y, He W J, Gu G H, *et al.*. Approach for LIDAR signals with multiple returns[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(30): 6963-6969.
- 13 Wallace A M, Ye J, Krichel N J, *et al.*. Full wave form analysis for long-range 3D imaging laser radar[J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 13: 229-241.
- 14 Yin Wenye, He Weiji, Gu Guohua, *et al.*. A new full waveform analysis approach using simulated tempering Markov chain Monte Carlo method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(16): 164205.  
尹文也, 何伟基, 顾国华, 等. 模拟回火马尔可夫链蒙特卡罗全波形分析方法[J]. *物理学报*, 2014, 63(16): 164205.
- 15 Sklar B. *Digital communications*[M]. New Jersey: Publishing House of Electronics Industry, 1998: 42-45.
- 16 He W, Sima B, Chen Y, *et al.*. A correction method for range walk error in photon counting 3D imaging LIDAR[J]. *Optics Communications*, 2013, 308(1): 211-217.
- 17 Marin S H, Wallace A M, Gibson G J. Bayesian analysis of lidar signals with multiple returns[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2007, 29(2): 2170-2180.