

基于单光子探测机理的伪随机码测距性能研究

沈姗姗^{1,2} 陈 钱¹ 何伟基¹ 陈云飞¹ 尹文也¹ 戴慧东¹

(¹ 南京理工大学电子工程与光电技术学院微光夜视技术实验室, 江苏 南京 210094)
² 南京理工大学紫金学院, 江苏 南京 210046)

摘要 建立了伪随机码测距的系统测距模型,从光子统计理论出发提出一种新的系统输出信噪比模型。蒙特卡罗算法模拟不同系统死时间下,系统输出信噪比和伪随机码码型的关系。理论模型与蒙特卡罗仿真基本吻合,结果表明信噪比随着伪随机码 1 的比例增大先增大再减小,选择最佳的发送码型可以获得最佳信噪比。根据新的模型,系统死时间的降低可提高信噪比,光子计数值增大,信噪比先增大再减小。引入系统高斯抖动,重构接收脉冲时间记录值,码速越高单点记录值出现误差的可能性越大,选取 1 GHz 的码发送速率可完全避免距离数值误差。

关键词 遥感;统计光学;激光测距;雪崩触发概率;信噪比模型;系统抖动

中图分类号 O436; N958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1012001

Research on Performance of Random Bitstream Ranging System Based on Single Photon Detection Theory

Shen Shanshan^{1,2} Chen Qian¹ He Wei-ji¹ Chen Yun-fei¹ Yin Wen-ye¹ Dai Hui-dong¹

(¹ *Low Light Level Night Vision Technology Laboratory, College of Electrical Engineering and Optical Technique, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*
² *Nanjing University of Science and Technology Zijin College, Nanjing, Jiangsu 210046, China*)

Abstract Pseudo-random bitstream ranging model is researched and a new output signal to noise ratio (SNR) model based on photon statistics model is proposed. The relationship between SNR and code pattern of pseudo-random bitstream with different dead time is studied by Monte-Carlo simulation. The theory model is almost consistent with Monte-Carlo simulation. The results show that with the fraction of randomly distributed 1-bits in transmitted pattern increased, the system SNR is getting better firstly and then getting worse. Best pattern of transmitted bitstream according to different dead time may lead to the best SNR. According to new output SNR model, lower dead time brings better SNR. The system SNR increases firstly then gets down with the growing signal photon counting. Gaussian distribution timing jitter is introduced to reconstruct received bitstream pattern formed from the arrival times of returning single photon. It is found that higher rate of bitstream brings higher possibility error of single time value. Suitable bits rate is restricted to 1 GHz to reduce the probability of ranging error.

Key words remote sensing; statistical optics; laser ranging; avalanche triggered probability; signal to noise ratio model; system jitter

OCIS codes 120.0280; 030.6600; 040.1345

1 引 言

时间相关单光子计数 (TCSPC) 技术在三维成像^[1-3]、测距测高^[2,4-8]等领域中运用广泛。在较低

激光发射功率下,实现以激光发射脉冲同步触发电平为时间起始点,记录单个光子往返时间,经过多次测量和相关距离提取算法^[9]可得到精度较高的距离

收稿日期: 2014-04-17; 收到修改稿日期: 2014-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61101196, 61271332)、博士后科学基金(2012M521085)

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: ssssoner@gmail.com

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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

数值,然而该方法对于高速、远最大不模糊距离、高信噪比测距并不占优势。将在通信领域中广泛应用的伪随机码调制应用到测距系统中,工作在盖革模式的雪崩二极管作为单光子探测器,接收的目标信号光子很容易被噪声淹没。针对此,伪随机码测距利用时间到达点的相关性改善信噪比(SNR)^[10]。单光子探测伪随机码系统测距成为国内外研究热点^[7,11-12]。文献[2]应用 3.35 GHz 的伪随机码发生器驱动激光器发送激光脉冲,TCSPC 时间记录仪记下码为 1 时对应光子到达时间,获得三维成像深度值和高距离精度。文献[13]从傅里叶变换理论出发,研究新码型的系统的抗噪声性能。文献[11]设计伪随机码 1 的比例为 0.1,并在总结中讨论到,如果增加伪随机码 1 的比例可以增大信号的探测效率,但是背景噪声的相关程度变高。从中,伪随机测距的系统性能逐渐成为研究热点。然而,在近几年的研究中,决定系统性能的信噪比,仅仅通过简单的线性关系给出^[2,7,14-15],至今还没有从光子统计学角度研究伪随机码码型、死时间对信噪比等系统性能的影响。无法将实际探测过程中的单光子探测机理引入到系统性能的诠释中。因此,基于单光子探测机理的研究更能从理论层面分析伪随机码测距信噪比、误差产生概率等性能指标。

本文建立数学模型描述伪随机码新的信噪比模型,从单光子探测机理的统计学角度引入雪崩触发概率,研究分析伪随机码码型、伪随机码比特流发送码速、探测器死时间、系统抖动等对测距信噪比和测距误差概率的影响。具体体现在理论建模和蒙特卡罗仿真的建立。由于单光子探测在死时间范围内只进行一次有效探测,确立短死时间^[16-17]探测器信号光子雪崩触发概率模型,将此引入伪随机码测距信噪比模型。蒙特卡罗算法研究伪随机码测距过程,考虑不同的短死时间和光子计数下,系统输出信噪比与序列中 1 的比例的关系。建立抖动、码速与误差概率数学模型,确立合适的码发送速率,分析理论模拟和仿真结果的一致性。

2 伪随机码测距模型建立与模拟分析

2.1 测距模型

系统的原理图如图 1 所示。随机脉冲发生

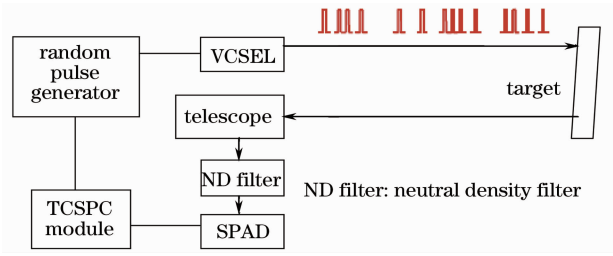


图 1 系统原理图

Fig. 1 System principle chart

器生成伪随机码 0、1 序列,带箭头的实线为光波传输方向,实线是系统电气连接线。码为 1 时触发垂直腔表面发射激光器(VCSEL)发射光脉冲,序列开始发送的同时,同步触发 TCSPC 模块计时。脉冲激光经目标后漫反射得到反射信号由接收光学系统接收,到达工作在改盖革模式的单光子探测器(SPAD)感光面。SPAD 启动一次光子探测并驱动 TCSPC 产生时间到达记录值,经过上述发射接收过程,系统完成一次序列的有效探测。伪随机码随机触发探测器,接收序列和发送序列相关得到目标距离值。

定义接收序列^[8]

$$R(n) = P_R a(n) + b(n), \quad (1)$$

式中 $a(n)$ 为发射码元序列, $b(n)$ 为背景噪声, N 为伪随机码码长, P_R 为激光脉冲平均接收功率。将接收到的信号与发送伪随机码 $a(n)$ 做相关运算,可得到

$$C(m) = \sum_{n=0}^{N-1} R(n)a(n-m), \quad (2)$$

$$C(m) = \sum_{n=0}^{N-1} [P_R a(n) + b(n)]a(n-m), \quad (3)$$

$$C(m) = \sum_{n=0}^{N-1} P_R a(n)a(n-m) + \sum_{n=0}^{N-1} b(n)a(n-m), \quad (4)$$

(4)式第一项即为自相关函数,其最大值包含目标所处位置。从表达式看出,相关的结果 $C(m)$ 包括信号光子数和噪声光子数 C_{ms}, C_{mn} 两部分,不仅和信号、噪声平均功率有关,还与和码长、码为 1 的比例有关,其大小影响系统输出信噪比。由于信号与噪声数目服从泊松分布,并且两者互相独立,可得相关结果的信号和噪声光子数的均值 $E[C_{ms} + C_{mn}]$ 和方差 $V[C_{ms} + C_{mn}]$ 相等,表示为

$$V[C_{ms} + C_{mn}] = E[C_{ms} + C_{mn}] = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ R_a N P_R + E \left[\sum_{n=0}^{N-1} b(n)a(n-m) \right] \right\} / h\nu dt = \int_{t_1}^{t_2} (R_a N P_R + R_a N P_B) / h\nu dt, \quad (5)$$

式中 R_a 表示码为 1 的比例, P_B 为背景噪声的平均功率^[7], $h\nu$ 为单个光子能量, $t_2 - t_1$ 为一个码元宽度。探测过程中, 假设单个发射脉冲的接收光子数目和噪声光子数目分别为^[15]

$$C_s = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_R dt}{h\nu}, \quad (6)$$

$$C_n = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_B dt}{h\nu}, \quad (7)$$

式中 $C_{s,n}$ 为由激光接收平均功率和噪声平均功率决定的平均总光子数。

2.2 探测机理信噪比模型

假设噪声光子和信号光子两者均服从泊松分布, 设探测到的信号光子或者是噪声光子的概率 η_s 、 η_n 分别为^[14]

$$\eta_{s,n} = \frac{P_1 [1 - \exp(-m_{s,n})]}{C_{s,n}}, \quad (8)$$

式中 P_1 为雪崩触发概率, 探测器实际光子探测率和死时间有关。单光子探测器在探测到光子后, 在一段时间内无法再次启动探测光子, 该时间称为死时间。假设探测器工作在平稳状态下, 雪崩触发概率可以简化为

$$P_{1s,1n} = 1/[1 + d_t \times \varphi_{s,n}(t)]. \quad (9)$$

雪崩触发概率和信号探测概率的乘积作为光子的总探测概率^[17][(8)式]。本文将此概率分别引入信号噪声比模型中。 m_s, m_n 分别为探测到的平均信号光子计数和噪声光子计数, $C_{s,n} = m_{s,n}/\eta, \eta$ 为量子效率, d_t 为探测器死时间。通常情况下, $m_s =$

$\int_{t_1}^{t_2} \varphi_s(t) dt$, 可以得到 $\varphi_s(t) = \frac{m_s}{(t_2 - t_1)} = m_s \times$

1 (GHz), 该公式针对的是固定频率脉冲发送的情况。 η, C_s 固定不变, 伪随机码比特流发送速率为 1 GHz 时, 码为 1 的比例不同即实际激光脉冲发送频率不同, 导致光子流速率不同。设 $\varphi_s(t)$ 光子流速率与实际激光脉冲发送频率和每个脉冲包含的平均光子数成正比。因此令 $\varphi_s(t) = R_a \times 1 \times 10^9 \times m_s$ (Hz), 可见, 在 1 的比例 100% 时, 输入激光脉冲发送频率可达到最大值 1 GHz。噪声与信号相互独立, 同理可以得到噪声光子流速率 $\varphi_n(t) = 1 \times 10^9 \times m_n$ 。

将上述雪崩触发概率和信号探测概率的乘积引入输出信噪比模型中, 可得新的输出信噪比模型为

$$O_{\text{SNR}} = E(C_{ms}^2)/V(C_{mn} + C_{ms}) =$$

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} (\eta_s R_a N P_R / h\nu) dt \times \int_{t_1}^{t_2} (\eta_n R_a N P_R / h\nu) dt}{\eta_s R_a N C_s + \eta_n R_a N C_n}. \quad (10)$$

将(8)式代入(10)式可得

$$O_{\text{SNR}} = \frac{\eta_s R_a N C_s}{1 + \frac{\eta_n C_n}{\eta_s C_s}} = \frac{P_{1s} [1 - \exp(-m_s)] R_a N}{1 + \frac{P_{1n} [1 - \exp(-m_n)]}{P_{1s} [1 - \exp(-m_s)]}}. \quad (11)$$

系统输出信噪比与码长成正比。由于引入了雪崩触发概率, 输出信噪比并不和码中包含 1 的比例成正比。原因是码为 1 的比例大于一定数值时, 雪崩触发效率反而会降低。

2.3 伪随机码性能分析

设周期发送脉冲串的最大不模糊距离 d_{unl} 为

$$d_{\text{unl}} = c/(2f), \quad (12)$$

式中 c 为光速, f 为激光脉冲频率。当激光脉冲频率为 20 MHz 时, 其不发生距离模糊的最大距离为 7.5 m, 意味着为了避免距离模糊必须以牺牲激光脉冲发射频率为代价, 而伪随机码测距可以克服这一劣势。伪随机码码长决定最大不模糊距离 d_{un} , 可以表示为^[2]

$$d_{\text{un}} = cb/(2f_{\text{ref}}), \quad (13)$$

式中 f_{ref} 为比特流发送速率, b 表示码的位数, 可以增加码的位数来获取较高的距离不模糊数值, 并且码的位数越高, 最大不模糊距离越大。本实验采用伪随机码长度 65535, 最大不模糊距离达 9000 m。

测距精度是系统性能衡量的重要指标, 伪随机码调制激光测距的距离分辨率由码元宽度 Δt , 或者是由比特流发送速率 $f_{\text{ref}} = 1/(\Delta t)$ 决定。系统精度为

$$\Delta d = c/(2f_{\text{ref}}). \quad (14)$$

由(14)式看出, 高速率获得高精度。由于本系统抖动半峰全宽 F_{FWHM} 为 440 ps, 选择比特流发送速率 1 GHz。假设系统抖动服从高斯分布, 其概率密度函数可表示为^[15]

$$P_{\text{jitter}}(t) = \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi \times F_{\text{FWHM}}^2}} \exp\left(\frac{-4\ln 2}{F_{\text{FWHM}}^2} t^2\right). \quad (15)$$

不考虑光子到达时间的分布, 根据(15)式, 比特流发送速率 f_{ref} 为

$$f_{\text{ref}} = (1/1000 - \alpha_1) \times 1000, \quad (16)$$

式中 α_1 为中间变量。可得到在不同比特流发送速率下, 时间记录点产生误差概率为

$$P_{\text{error}} = 1 - P_{\text{jitter}}(t) \quad (-\alpha_1 < t < \alpha_1). \quad (17)$$

速率越高, 抖动使得时间到达记录值误差发生的概

率增大。对于抖动较小的系统可选较高速率。

2.4 伪随机码测距模拟

2.4.1 理论模拟和算法分析

采用蒙特卡罗算法模拟单光子探测伪随机码测

距过程。生成 1 的比例不同的伪随机码发送码型，根据探测机理得到接收码型，算法流程如图 2 所示。探测过程分为：探测到噪声光子，生成噪声光子到达时间；探测到信号光子，生成光子到达时间；将噪声

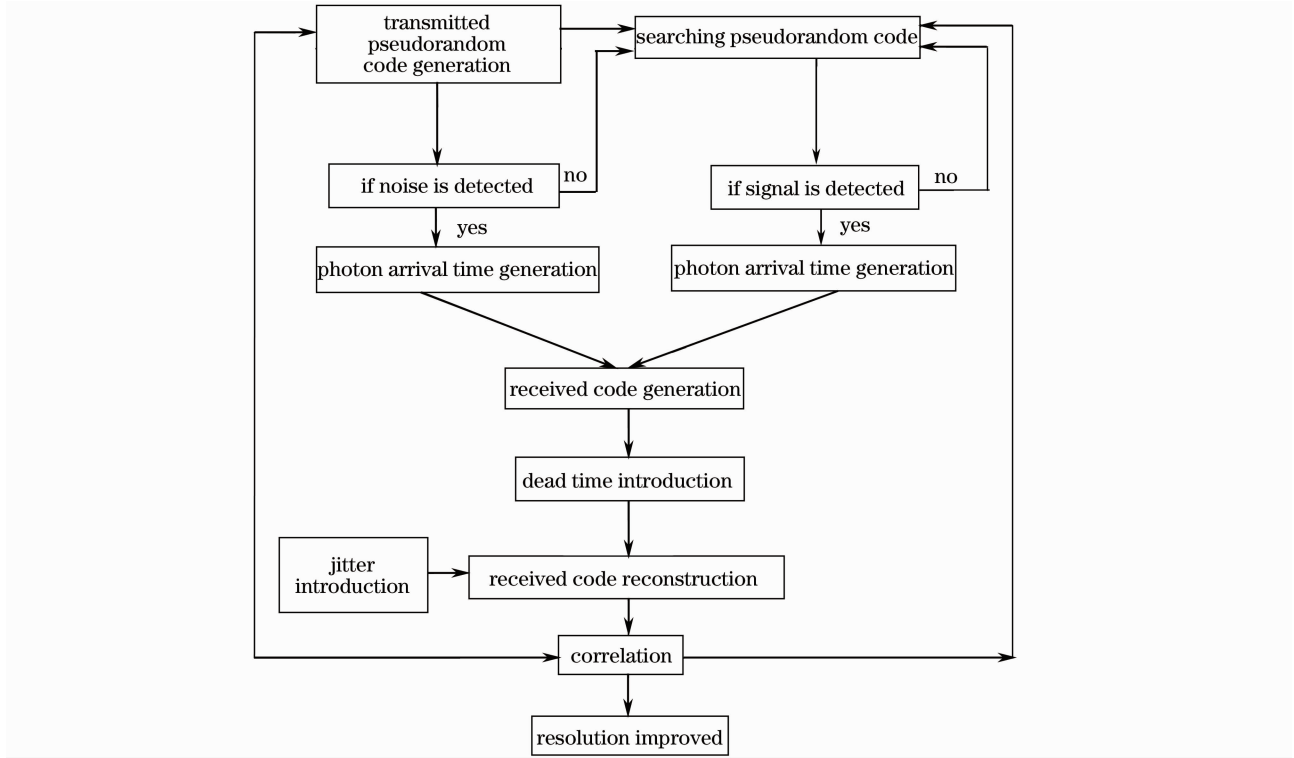


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm process

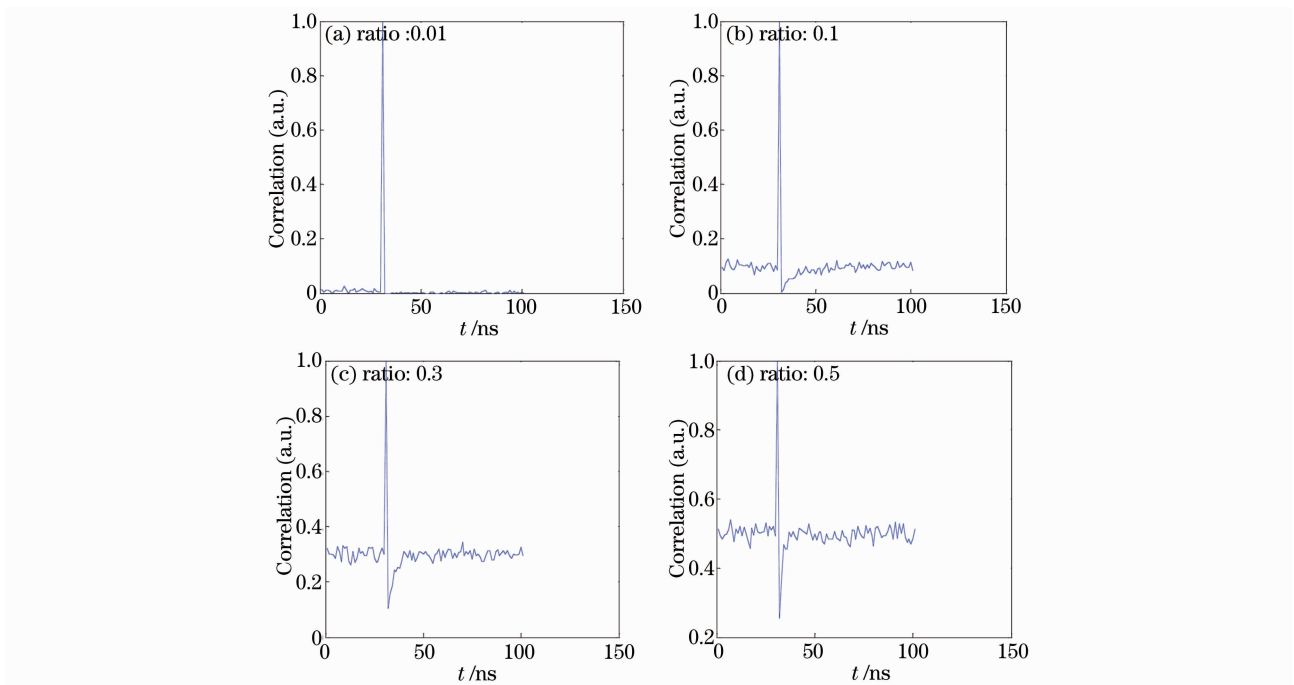


图 3 不同比例 1 目标相关距离像

Fig. 3 Correlation range images with different ratios of one bit

光子和信号光子到达序列合成接收序列。实际系统中的单光子探测器大多采用主动淬灭技术,探测器在每个工作周期通常只进行一次有效探测,其死时间只有 50~100 ns,本系统死时间为 80 ns。引入探测器死时间,即接收序列中相邻的两个 1 小于死时间,则该码 1 去掉,大于则保留。最后,考虑探测器的抖动效应,假设探测器抖动如(15)式成高斯分布,随机生成符合高斯分布的抖动值,得到引入抖动后到达时间序列。接收序列和发送序列相关得到距离值。

将相关结果归一化并且取峰值附近 100 点数据,信号光子计数为 2、噪声光子计数为 0.01、驱动激光器的比特流速率为 1 GHz,图 3 分别考虑码中 1 的不同比例下系统相关距离像。从中可看出信噪比变化趋势。码比例从 0.01 开始,随着序列中 1 的比例增大,相关距离的信噪比变小。原因是 1 的比例增多使得两个 1 之间小于 80 ns 死时间的可能性增大,则发射序列中包含 1,但接收序列中不包含时间记录值的情况增多,这些点使得信号的相关度下降,体现为信噪比下降。码比例的减小可以得到信噪比改善,但一味减小会使得样本点不足。为获得准确的信号噪声比性能,还需研究具体变化规律。根据(9)式,得出伪随机码码长 65535 下系统数值模拟结果如图 4 所示,蒙特卡罗实验和理论模拟变化趋势基本吻合。仍然存在理论与仿真的误差,原因如下:2.2节引入雪崩触发概率中,即使码比例固定,

实际光子流速率也是随机变化,并不和码为 1 的比例成简单的线性关系。由图 4 可知,当码比例在 0.001~0.08 之间,码为 1 的比例很小,相邻两个 1 之间小于死时间的概率小,信噪比随着码的比例的升高而升高。当码的比例到达一定数值,信噪比可达最大值。随着码比例的继续增大,相邻两个 1 之间小于死时间的概率变大,码比例越大,信噪比越小。在图 4 基础上,图 5 模拟了不同死时间信噪比变化。同一码比例下,死时间越大,信噪比越小。本文算法仿真计算结果在信号光子计数为 2、噪声光子计数为 0.01、死时间为 80 ns、比特流发送码速 1 GHz,也即码元宽度 1 ns 下,取伪随机码长 65535 中 1 比例为 0.0826 可得输出信噪比最大,假设量子探测效率为 0.3,则输入信噪比^[8] $I_{\text{SNR}} = \frac{C_s^2}{C_s + C_n} = 7$,信噪比提高 43 倍。

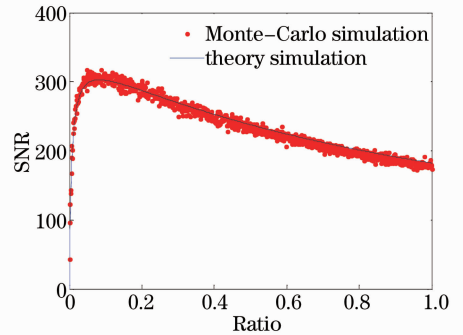


图 4 系统输出信噪比

Fig. 4 System output SNR

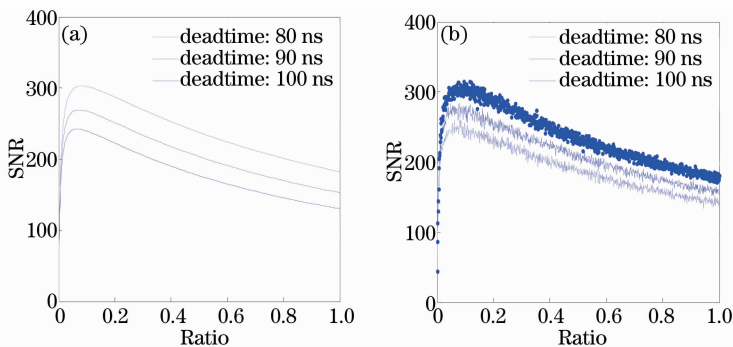


图 5 不同死时间系统输出信噪比模拟结果。(a) 理论模拟; (b) 蒙特卡罗模拟

Fig. 5 System output SNR simulation results with different dead time. (a) Theory simulation; (b) Monte-Carlo simulation

图 6 表示信噪比变化率的绝对值与 1 的比例关系。对信噪比求导,死时间越小,信噪比达到最大值对应 1 的比例越大。码比例一定,信噪比增大或减小的速率也随着死时间的增大而减小。

在噪声计数值为 0.01、码长为 65535、比特流发

送速率为 1 GHz、不同信号光子计数值下系统的信噪比随着码中 1 的比例的变化趋势如图 7 所示。随着伪随机码中 1 的数目增大,信噪比变化趋势依然是先增大再减小。信号光子计数值为 0.5 的信噪比大于光子计数值为 1 和 2 的信噪比,信噪比提高上

百倍。原因是当信号光子计数增大到达一定数值，探测到信号光子的概率趋近 1，即使探测到信号光子计数增多使得光子流速率增大，但死时间使得实际探测到的光子数下降，信噪比下降。同等条件下，码比例取 0.1，图 8 印证上述结论，即系统输出信噪比和目标信号光子计数值并不成简单线性增长关系。如图 8 所示 根据 $C_{s,n} = m_{s,n} / \eta$ ，探测效率一定，增大信号平均光子计数，探测到信号的概率增大，系统信噪比总体增大，当光子计数值增大一定数值，信噪比开始减小。

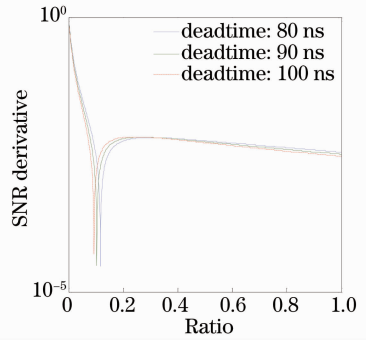


图 6 信噪比变化率随码为 1 比例的变化
Fig. 6 Changing rate of SNR with ratio of 1-bit

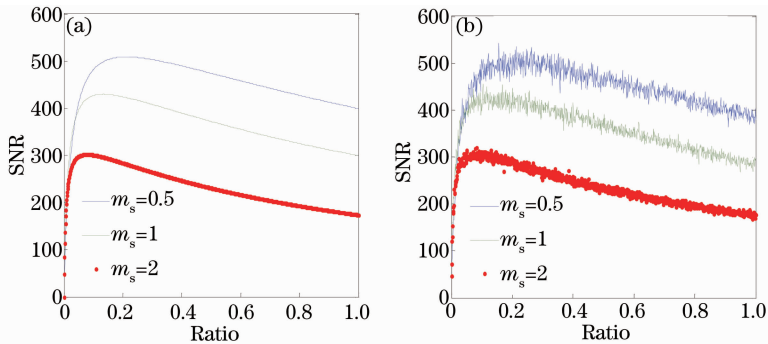


图 7 不同光子计数值下系统输出信噪比。(a) 理论模拟；(b) 蒙特卡罗模拟
Fig. 7 System output SNRs with different photons counts. (a) Theory simulation;
(b) Monte-Carlo simulation

2.4.2 系统抖动模型数值模拟和仿真

在光子到达时间基础上，考虑系统抖动，会导致到达时间的超前或退后，在超前或者退后一个码元时间内，不会导致误码率。超前或者退后多个码元的宽度，会引起一个或者多个码元宽度误差。图 9 分别给出了理论模拟及蒙特卡罗算法下 1000 次单个记录值误差可能性概率 P_{error} 。比特流发送速率高，出现误差的概率大。同等比特流发送速率，抖动越大误差产生的概率越大，码发送速率受到系统抖动制约，仿真结果和理论吻合。文献[8]研究误码发生位数对码自相关影响。本文基于互相关理论，研

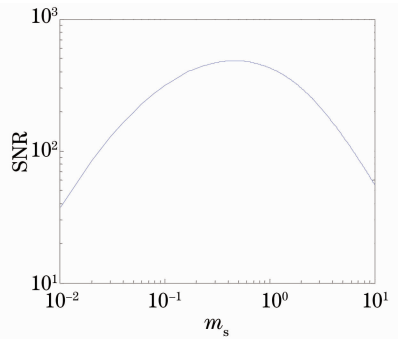


图 8 信噪比与光子计数之间的关系
Fig. 8 Relationship between SNR and photon counts

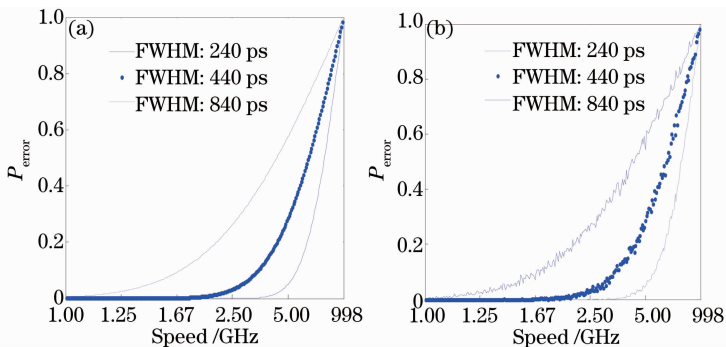


图 9 误差概率。(a) 理论模拟；(b) 蒙特卡罗模拟
Fig. 9 Error probabilities. (a) Theory simulation; (b) Monte-Carlo simulation

究高斯抖动导致的互相关距离值的偏差概率。图 10 分别给出 1、3、5、10 GHz 4 种速率下 500 次实验的互相关距离误差发生概率。实现过程如下：生成光子时间到达数值；得到引入抖动后的时间到达数值，根据该数值确定此到达点落入的码元单元；将接收的序列和发送序列相关，峰值对应横坐标为光子到达时间。随着比特流发送速率的增长，单点产生误差的位数增多，相关距离值发生偏移的概率加大。图 10 蒙特卡罗仿真结果显示比特流发送速率为 10 GHz 的相关距离误差为 100%。本实验系统抖动为 440 ps，选取 1 GHz 的码发送速率，相关距离值不产生误差。

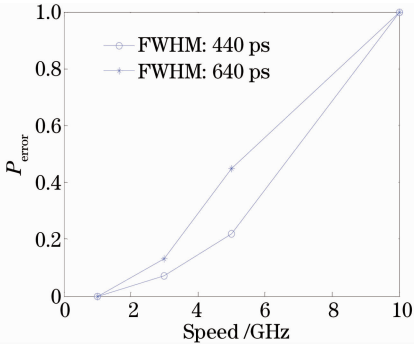


图 10 相关距离值误差概率

Fig. 10 Correlation range error probabilities

2.4.3 精度改进蒙特卡罗仿真

系统的抖动为 440 ps 左右，比特流发送速率定在 1 GHz 可最大程度减小距离值的误差。而 1 GHz 的速度限制测距精度在 0.2 m。为了提高系统测距精度，选择测量时间 1300 μ s，取 130000 左右个时间记录点作为样本点。根据图 2，在 20229 这个距离单位中也有较高的相关值，光子到达时间在 20229~20231 范围内逐步减去 10 ps，减去的数值应该大于或者等于系统本身的最小分辨单元，减去后的光子到达时间数值仍然在 -220~220 ps 内则

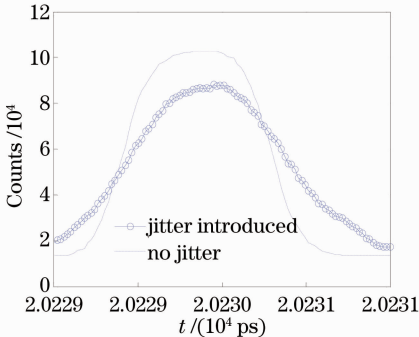


图 11 距离精度改进算法蒙特卡罗模拟

Fig. 11 Improved accuracy algorithm Monto-Carlo simulation

保留该数据，不在范围内则舍去，可得峰值为考虑抖动后精度改进距离值。图 11 为加入抖动后波形展宽，去掉一部分由抖动产生的光子，相关光子计数值变小。

3 结 论

基于时间相关单光子测距互相关理论、引入雪崩触发概率模型，得到新的信噪比模型。运用蒙特卡罗算法实现伪随机码单光子测距，不考虑大气湍流效应，系统输出信噪比比输入信噪比提高上百倍。结合理论数值模拟和蒙特卡罗算法研究得到以下结论：1) 发射码为 1 的比例并不和信噪比成正比，理论和仿真实验证明：不同死时间下可以得到最佳信噪比对应的码型。计算结果在信号光子计数为 2、噪声光子计数为 0.01、探测器死时间为 80 ns 下，取伪随机码长 65535 中 1 比例为 0.0826 可得系统最佳信噪比。同等条件下，不同信号光子计数值，最佳信噪比对应码比例不同。2) 码比例一定时，提高 m_s 、信号光子计数值或增大激光发射功率可提高信噪比，但继续提高发射功率将会使信噪比下降。以上两点共同说明：码比例增大和光子计数值的增大都使得光子流速率增大，然而雪崩触发概率使得光子计数受限，信噪比先增大后降低。与理论分析吻合。比特流发生速率确定，垂直表面激光器确定，则单个脉冲平均功率确定，码比例决定总输出功率，在固定 m_s 下，存在最佳码比例可获得输出最佳信噪比。3) 在同一系统抖动下，较高的比特流发送速率可获得较高的距离精度，然而较高的比特流发送码速时间记录值的偏差较大，产生的距离误差可能性越大。抖动 440 ps 下，码速选择在 1 GHz 左右可降低相关距离误差发生的概率。最后，选择 64 kbit 码长以获得 9000 m 最大不模糊距离，精度改进法粗略的将一部分超过抖动范围的时间到达点去除，提高精度到 10 ps。

参 考 文 献

- 1 G S Buller, A M Wallace. Ranging and three-dimensional imaging using time-correlated single-photon counting and point-by-point acquisition [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(4): 1006-1015.
- 2 N J Krichel, A McCarthy, G S Buller. Resolving range ambiguity in a photon counting depth imager operating at kilometer distances [J]. Opt Express, 2010, 18(9): 209-213.
- 3 W He, B Sima, Y Chen, et al.. A correction method for range walk error in photon counting 3D imaging LIDAR [J]. Opt Commun, 2013, 308(1): 211-217.
- 4 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, et al.. Research

- in the ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0514003.
- 姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0514003.
- 5 Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong, *et al.*. Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0414003.
- 徐 璐, 张 宇, 张 勇, 等. 盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0414003.
- 6 A McCarthy, R J Collins, N J Krichel. Long-range time-of flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting [J]. Appl Opt, 2009, 48(32): 6241–6251.
- 7 Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. 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, 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.
- 8 Ye Shunliu, Zhu Shaolan, Sun Qibing, *et al.*. Application of pseudo-random sequence in lidar ranging [C]. ICIECS, 2009, 978(1): 4244–4994.
- 9 R E Warburton, A McCarthy, A M Wallace. Subcentimeter depth resolution using a single-photon counting time-of-flight laser ranging system at 1550 nm wavelength [J]. Opt Lett, 2007, 32(15): 2266–2268.
- 10 Q Zhang, H W Soon, H T Tian, *et al.*. Pseudo random single photon counting for time resolved optical measurement [J]. Opt Express, 2008, 16(17): 13233–13239.
- 11 P A Hiskett, C S Parry, A McCarthy, *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.
- 12 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.
- 13 A Rybaltowski, A Tafflove. Signal-to-noise ratio in direct-detection midinfrared random-modulation continuous-wave lidar in the presence of colored additive noise A-V [J]. Opt Express, 2001, 9(8): 386–399.
- 14 N J Krichel, A McCarthy, R J Collins. Anti-aliasing techniques in photon-counting depth imaging using GHz clock rates [C]. SPIE, 2010, 7681: 768108.
- 15 M S Oh, H J Kong, T H Kim. Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode [J]. Opt Commun, 2010, 283(2): 304–308.
- 16 S Johnson, P Gatt, T Nichols. Analysis of geiger-mode APD laser radars [C]. SPIE, 2003, 5086: 359–368.
- 17 P Gatt, S Johnson, T Nichols. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics [J]. Appl Opt, 2009, 48(17): 3261–3275.

栏目编辑: 史 敏