

单光子测距系统性能优化研究和实现

沈姗姗^{1,2}, 陈 钱¹, 何伟基¹, 周 萍³, 顾国华¹

(1. 南京理工大学 江苏省微光成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学紫金学院, 江苏 南京 210046; 3. 江苏省中油天工机械有限公司, 江苏 扬州 225231)

摘 要: 为了实现单光子测距系统的最佳性能接收, 积分时间一定, 分别研究激光功率对该系统的信噪比和距离精度的影响。首先, 基于单光子探测机理, 引入雪崩触发概率到固定频率的多脉冲累计探测系统线性信噪比模型中, 蒙特卡洛仿真和理论模拟一致验证随着激光发送功率的增大, 信噪比先增大再趋于稳定数值。其次, 建立距离值的方差理论模型, 蒙特卡洛仿真研究随着激光功率的增大, 距离值精度提高并且趋于稳定数值, 死时间增大可降低时间记录点的方差。实验结果表明, 在积分时间 50 ms 和高背景噪声下, 发射功率 400 μW 左右信噪比可达到最大值, 距离精度可达到 6 mm 的最优值。最终, 理论和实验共同验证该系统可以实现单光子测距系统的信噪比和距离精度的最佳性能接收。

关键词: 单光子探测; 短死时间; 精度; 信噪比

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0217001

Research and realization on performance of single photon counting ranging system optimizing

Shen Shanshan^{1,2}, Chen Qian¹, He Weiji¹, Zhou Ping³, Gu Guohua¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligence Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. College of Zijin, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210046, China; 3. Jiangsu Sinopetro Superbskill Machine Co.Ltd, Yangzhou 225231, China)

Abstract: In order to realize the best performance receiving ranging system based on single photon counting, based on the constant integration time, the system output SNR and range precision were studied with the increased laser power. First, the "arm probability" was introduced to the linear SNR model based on fixed frequency multi-pulse accumulation detection system. Monte Carlo simulation and theory simulation all proved that with the increased laser power, the SNR got larger and became stable. Then the range deviation model was settled, with the increased laser power, range precision enhanced and became stable by Monte Carlo simulation. Experimental results indicate that based on high background noise, the maximum of SNR can be obtained with emitting laser power at about 400 μW at 50 ms integrated time. Range precision reaches the optimal level at 6 mm. Finally, theory and experiment all prove that the optimal performance receiving of SNR and precision is achieved on single photon counting ranging system.

Key words: single photon detection; short dead time; precision; SNR

收稿日期: 2015-06-20; 修订日期: 2015-07-22

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

作者简介: 沈姗姗(1985-), 女, 讲师, 博士生, 主要从事激光雷达三维成像方面的研究。Email: 315161772@qq.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。Email: chenq@mail.njust.edu.cn

0 引言

近几年,固定频率多脉冲累积时间相关单光子计数技术被广泛应用于三维成像^[1-4]、测距测高等^[2,5-8]系统中。以激光发射脉冲同步触发时间到达记录仪开始计时,记录单个光子往返时间,经过多次测量得到包含距离信息的激光脉冲回波。激光脉冲多次累积可以改善探测性能^[9]。由于激光脉冲不可能无限累积,并且增大累积量会带来测距速率的降低,在一定的累积时间下,寻找最优接收性能就有研究的必要。测距系统的信噪比和距离精度是测距性能好坏的主要衡量标准。在高精度的激光 3D 成像系统中,信噪比达到上百才有可能实现比普通波距离测量精度较好的测距性能^[3]。参考文献[8]从置信区间角度分析了激光雷达的测距精度随着信噪比的增大而增大。可见,信噪比的提高和距离精度密切相关。然而,大多数固定频率的多脉冲累积单光子探测系统的测距实验在背景噪声较低的暗室环境下进行^[10-11],背景噪声几乎可以忽略不计,输出信噪比的理论模型大多基于线性模型给出^[6-7],没有考虑到光子探测统计规律和系统死时间效应对测距精度、性噪比等探测性能的影响。固定频率多脉冲累计探测的“长死时间”^[9,12]的理论和仿真研究也表明,激光发射功率可以优化系统的探测性能。由于长死时间探测器读出电路的速度限制,目前研发的单光子探测器死时间多是纳秒级别的短死时间。参考文献[11]研究了“短死时间”随机码测距性能。短死时间下,激光功率对固定频率多脉冲累计探测系统精度等性能的影响有其研究的意义。

文中针对固定频率多脉冲累计单光子测距系统,从光子统计学角度出发,将短死时间“雪崩触发概率”^[11]引入到传统的信噪比模型中,研究激光功率对系统性能的优化。从理论和实验两个角度验证了:激光功率的增大使得信噪比先迅速增大,最终再趋于稳定数值。在噪声背景为 500 000 c/s 下,选择最大发射功率约 400 μW,可以使得系统的输出信噪比达到最优,并将雪崩触发概率引入距离精度模型,蒙特卡洛模拟和实验共同验证了:以一定时间范围内的时间到达点方差作为距离精度特征量,信噪比达到最优的同时,系统的测距精度也可以达到最优。

1 系统模型

通过从所累积探测到的光电子计数分布中获得距离信息,单光子固定频率脉冲三维成像深度信息获取系统输出信噪比 SNR 可以线性的表达。文中定义 M_s, M_n 分别为 N 脉冲累计探测到的信号总光子数和噪声总光子数^[13],如公式(1)所示:

$$SNR_o = \frac{E[M_s]^2}{\text{Var}[M_n+M_s]} = \frac{E[M_s]^2}{E[M_n]+[M_s]} \quad (1)$$

式中: $E[M_s]=Nm_s, E[M_n]=Nm_n, N$ 为脉冲累积次数。

发送的激光脉冲波形用公式(2)表示,可看作初始光子数 A_s 随着时间变化的函数^[2,14],其中 $P_E(t)$ 为激光发射功率,发射激光脉冲中包含的光子流密度为 $\varphi_s(t)$ ^[2]:

$$\varphi_s(t) = A_s \frac{(t-t_D)}{\tau} \exp\left(-\left(\frac{t-t_D}{\tau}\right)\right) = \frac{P_E(t)}{hv} \quad (2)$$

不考虑大气湍流影响,设每一个接收到的激光脉冲在时间间隔为 t_2-t_1 时平均包含噪声光子数目 m_n 和信号光子数 m_s 为^[15]:

$$m_s = \frac{\eta_Q \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_E(t)FOV^2 \rho \cos(\theta_{\text{target}}) A_R \eta_T \eta_R}{\theta_T^2 d^2} dt}{\eta_Q \int_{t_1}^{t_2} \varphi_n(t) dt} = \quad (3)$$

$$m_n = \frac{\eta_Q \int_{t_1}^{t_2} P_n dt}{hv} = \eta_Q \int_{t_1}^{t_2} \varphi_n(t) dt \quad (4)$$

式中: η_Q 为量子效率; FOV 为接收系统的视场角度; ρ 为目标反射率; θ_{target} 为激光光束与目标表面的法线角度; A_R 为望远镜接收口径; η_T 为发送光学系统透过率; η_R 为接收光学系统透过率; θ_T 光束发散角; d 为目标距离; $\varphi_s(t)$ 为接收到的信号光子流; $\varphi_n(t)$ 为噪声光子流; P_n 为噪声功率。根据公式(1),假设探测到的光子数服从泊松分布,光子数的均值与方差相等,输出信噪比可以表达为:

$$SNR_o = \frac{(N \times m_s)^2}{N \times m_n + N \times m_s} \quad (5)$$

公式(5)说明,增大积分时间 N 以及提高激光发射功率可增大信噪比。然而,实际上增大积分时间将导致以下两点:一是会增加探测时间,从而降低三维成像探测速度;二是随着 N 的增大或积分时间的增大,必然会带来噪声光子数的增多。文中主要考虑积

分时间一定的情况下系统的最佳性能。增大激光功率可以提高目标信号的接收功率，但由于死时间的存在，实际探测到的信号光子数不与激光功率成正比，信噪比不会无限增大。如果单一提高发射功率，必然带来能源的浪费。

根据上述模型缺陷引入探测器探测效率，重新定义系统输出信噪比。单光子探测器探测到光子后，在一段时间内无法再次启动探测光子，该时间称为死时间 dt ，探测器实际光子探测率与死时间有关，将此概率称为雪崩触发概率 p_1 。假设探测器工作在平稳状态下，雪崩触发概率可以简化为^[15]：

$$P_1=1/(1+dt\varphi_{r,n}(t)) \quad (6)$$

可以分别将信号光子流和噪声光子流代入表达式得到信号和噪声光子的雪崩触发概率。假设信号和噪声光子服从泊松分布，最终探测器探测概率为探测到信号或噪声光子的概率和雪崩触发概率的乘积，可以写为：

$$\eta_{s,n}=P_1(1-\exp(-m_{s,n})) \quad (7)$$

变换公式(4)，系统输出信噪比可以写为：

$$SNR_o=\frac{(N\times\eta_s\times m_s)^2}{N\times\eta_n\times m_n+N\times\eta_s\times m_s} \quad (8)$$

多脉冲累积下，对所测得的回波时间到达点在一定时间范围内取标准差，作为距离精度的表征， τ_{bin} 为最小分辨单元，距离精度可以表示为：

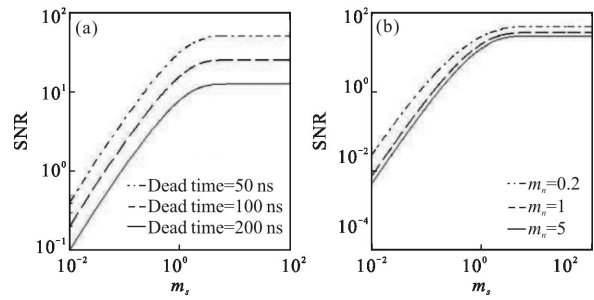
$$\sigma=\sqrt{\sum_1^G(i\tau_{bin})^2\times\eta_{s,n}-\left(\tau_{bin}\sum_1^G i\times\eta_{s,n}\right)^2} \quad (9)$$

2 实验结果与讨论

2.1 系统理论模拟及蒙特卡洛仿真

基于前文分析，信号光功率并不与信噪比成简单的线性正比关系。为了获取最佳的接收信噪比，研究新的信噪比模型中信噪比与死时间、信号光子数与噪声光子数的关系。图 1 中初始脉冲发射次数为 250000 次， $m_n=0.002$ ，分别模拟死时间为 50、100、200 ns 的信噪比变化趋势。随着信号光子数的增大，信噪比先增大再趋于稳定的数值。从数学上理解，信号光功率的增大可以使得公式(5)中增大的部分项增大迅速，体现为信噪比增大。然而，继续增大信号光功率，由于死时间的存在，光功率的继续增大使得雪崩触发概率 P_1 下降迅速，和增长的部分数值几乎互相抵消，最终乘积趋于稳定不变。从物理系统理解，由于

死区时间的存在，光子的探测数值达到最大稳定值，信噪比不会无限增大。由此，该系统可以通过控制光源功率使得系统信噪比达最优值。其次，噪声越大信噪比越低。系统的死时间越大，探测到信号的雪崩触发概率越低，信噪比整体降低，可以推断死时间为 0 时探测效率最高，信噪比最大。选用死时间较小的系统有利于提高输出信噪比。



(a) 不同死时间的输出信噪比 (b) 不同噪声的输出信噪比
(a) SNR with different dead time (b) SNR with different noise

图 1 信噪比模型

Fig.1 SNR model

图 2 模拟距离值标准差随着功率的变化趋势，随着探测到的光子数目的增大，开始时间点标准差下降，系统精度提高，当探测到的信号光子数增大到一定数值，信噪比保持一定，精度提高到一定数值后也随之保持不变。此外，死时间越大，距离点方差越小，与参考文献[16]的结论基本一致。

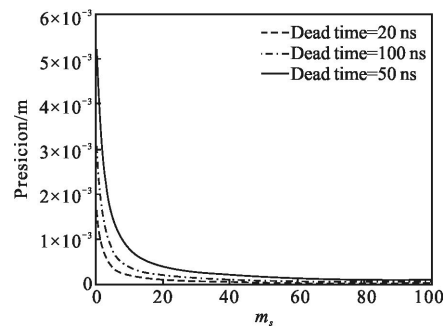


图 2 精度模型

Fig.2 Precision model

蒙特卡洛仿真实现多脉冲累积单光子探测过程如图 3 所示。(1) 确定系统初始化参数。主要包括生成以 8 ps 为系统最小分辨单元的时间间隔序列，激光脉冲重复发送频率为 5 MHz，确定脉冲发送次数为 $N=250\,000$ 。(2) 遍历每一个单元，根据信号与噪声的强度判断是否生成时间到达计数点。可以生成

则光子计数值加 1, 不生成则继续遍历下一个单元。如果噪声和信号光子都可以生成, 选择时间小的生成计数值。(3) 引入死时间, 相邻两个生成的光子计数值间隔大于死时间则保留。(4) 脉冲发送完毕后, 计算信噪比。由图 4 可得, 信噪比模型的蒙特卡洛模拟和理论模拟基本吻合。

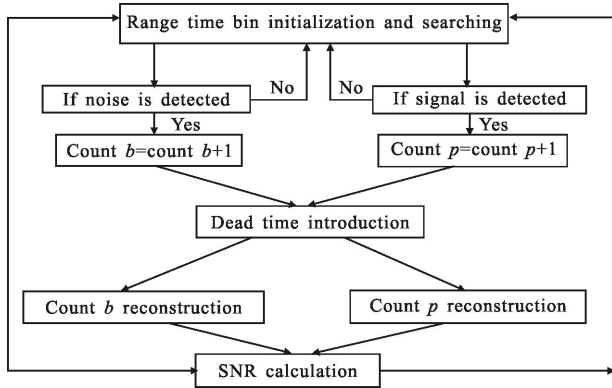


图 3 算法流程

Fig.3 Algorithm process

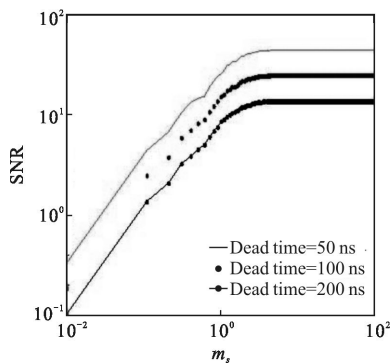


图 4 不同死时间系统输出信噪比模拟

Fig.4 System output SNR simulation with different dead time

2.2 系统最佳性能接收验证

实验系统原理图如图 5 所示, 带箭头的实线代表空域光路传播, 实线为电气连接线。激光器发送脉冲并且同步控制时间记录仪开始计时, 发出的激光

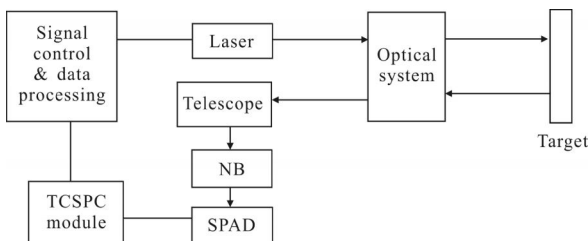


图 5 系统原理

Fig.5 System schematic principle

脉冲通过光学系统中的偏振分束棱镜后依次通过半波片和四分之一波片, 最后由系统物镜收集到大部分光回波信号。再通过 830 nm 窄带滤光片, 进入光纤耦合器导入 SPAD。数据控制和处理模块完成控制震镜扫描三维成像和基于 Labview 的数据获取以及处理。

在室内以钨灯作为背景噪声光源, 测量得到背景光强约为 500 000 c/s。关闭激光器, 测量在 50 ms 和 100 ms 下系统探测到的平均背景光子数。其次打开激光器, 测量不同激光功率在 50 ms 和 100 ms 积分时间下单点探测到的总平均光子数, 减去噪声光子数则为探测到的信号光子数。基于前文假设, 噪声和信号的探测相互独立。根据系统探测到的信号和噪声光子数计算出系统输出信噪比。其中, 接收到的信号光子计数值计算公式如公式(3), 参数如下: $\eta_Q=0.55$, $FOV=0.4 \times 10^{-3}$ rad, $\rho=0.9$, $\theta_{target}=0$ rad, $A_R=\pi \times 64 \times 10^{-4}$ rad, $\eta_r=0.33$, $\eta_R=0.5$, $\theta_r=6 \times 10^{-3}$ rad, $d=10$ m。

激光发射的频率越高发射功率越大, 激光脉冲发射频率为 5 MHz, 功率计测量激光发射功率范围为 1 μ W~4 mW 之间, 系统死时间为 90 ns 左右, 最小单元分辨率为 8 ps。

由于测量激光功率的最小分辨单元限制, 光子计数值在 1 以下的信噪比样本较少, 如图 6 所示。并且由于在固定发射频率下功率范围的限制, 最大测量的激光回波信号光子计数值约在 50 左右。随着光

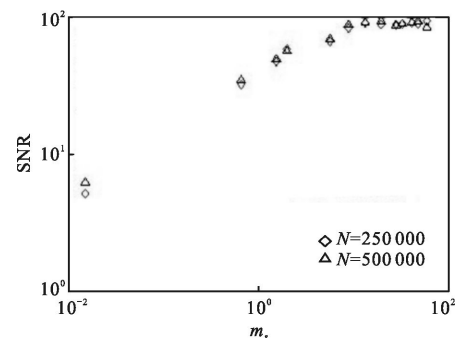


图 6 信噪比实验

Fig.6 SNR experiment

功率的增大信噪比先增大, 在 400 μ W 左右达到最大值。继续增大, 信噪比基本保持不变。与理论分析基本符合, 没有考虑大气以及目标反射率等因素对探测到的光子数的影响, 理论和实验数据有一定差值, 不影响整体变化规律。不同的积分时间下, 探测

到的信号与噪声光子数均有所增大,输出信噪比的变化不大,信噪比总体变化趋势基本不变。文中主要考虑积分时间一定情况的最优接收系统。

以公式(2)作为算法的激光脉冲模型,图 7 根据图 3 算法流程模拟激光波形,与实测波形基本一致,实测波形比原有波形有一定的展宽,考虑是系统抖动引起,但并不影响原本的光子计数值。在原有的实验和背景噪声基础上,目标距离为 10 m 左右处,积分时间 50 ms、死时间 90 ns,实验对探测到的时间记录点在峰值左右各取 40 点样本值做方差运算,作为距离精度提取量。蒙特卡洛仿真和理论模拟基本吻

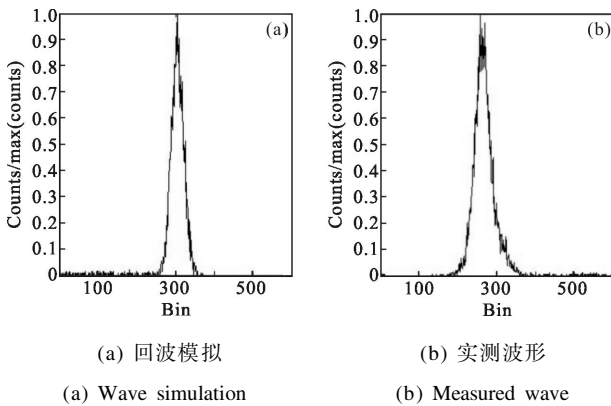


图 7 回波

Fig.7 Wave

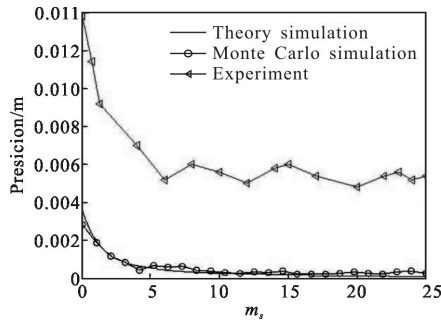


图 8 距离精度仿真和实验对比

Fig.8 Range precision simulation and experiment comparison

合(如图 8 所示),得到探测到的光子数在 0.01~25 范围内,对应的距离方差成下降趋势。并且在光子计数值达到 5~10 之后,其距离值方差基本保持在 1 mm 左右的最小值。方差越小代表其距离精度越高。仿真以及理论研究和实测数据有一定的差别,考虑原因之一:系统抖动造成距离值的浮动增大,根据参考文献[10],信号功率一定,抖动越大,距离精度越低。该实验系统的单光子探测器有约 500 ps 的抖动。原因

之二:大气湍流效应导致大气反射系数的浮动,从而使得测距系统性能下降,包括实测波形的展宽、测距精度和分辨率降低^[7]。文中所建立的模型和仿真均没有引入系统抖动和大气湍流效应,因此实验结果的精度差于理论仿真。实验证明,发射功率为 400~500 μW 左右,距离的浮动可以达到最小值,距离精度为 6 mm。

3 结论

文中基于固定频率多脉冲累积时间相关单光子探测统计原理,建立“短死时间”的单光子探测系统信噪比和距离精度模型。实验和蒙特卡洛仿真共同验证积分时间 50 ms 下,激光功率达到 400 μW 左右,根据公式(1)计算得到系统输出信噪比达到最优数值 98。实验测量激光发射功率 400~500 μW ,信噪比的最优使得距离值精度最优,背景噪声 500 000 c/s 下,距离精度可达最小值 6 mm。针对该系统,以理论作为支撑,实验验证实现距离 10 m 左右的目标探测的微瓦级功率和毫米级精度的系统最佳接收。

文中提出的理论模型没有考虑到大气传输、系统抖动等对信噪比、精度的影响,也不适用于研究激光功率一定、最优积分时间的最优系统接收。实验中,相同条件下,积分时间的变化没有带来明显的系统性能优化,如信噪比的优化。

参考文献:

- [1] Buller G S, Wallace A M. 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] Johnson S E. Cramer-Rao lower bound on range error for LADARs with Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(24): 4581-4590.
- [3] Philip Gatt, Steven Johnson, Terry Nichols. Dead-time effects on Geiger-Mode APD performance [C]//SPIE, 2007, 6550: 65500I-1-65500I-12.
- [4] He Weiji, Sima Boyu, Chen Qian, et al. Photon-counting imaging based on Geiger-Mode APD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1343-1349. (in Chinese) 何伟基, 司马博羽, 陈钱, 等. 基于盖格-雪崩光电二极管的光子计数成像[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1343-1349.
- [5] Min Seok Oh, Hong Jin Kong, Tae Hoon Kim. Reduction of

- range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(2): 304–308.
- [6] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, et al. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single photon Counting [J]. *Meas Sci Technol*, 2000, 11: 712–716.
- [7] McCarthy A, Collins R J, Krichel N J. Long-range time-of-flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting [J]. *Applied Optics*, 2009, 48 (32): 6241–6251.
- [8] Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, et al. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 39 (4): 0514001–1– 0414001–7. (in Chinese)
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, 39(4): 0514001–1– 0414001–7.
- [9] Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong, et al. Research on the detection performance of Geiger-Mode APD laser radar with accumulated detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0414003–1– 0414003–6. (in Chinese)
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): 0414003–1–0414003–6.
- [10] Liu Chenghao, Chen Yunfei, He Weiji, et al. Simulation and accuracy analysis of single photon ranging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 383–387. (in Chinese)
刘骋昊, 陈云飞, 何伟基, 等. 单光子测距系统仿真及精度分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 383–387.
- [11] 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): 1012001–1–1012001–6. (in Chinese)
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): 1012001–1–1012001–6.
- [12] Steven Johnson, Philip Gatt, Terry Nichols. Analysis of Geiger-Mode APD laser radars [C]//SPIE, 2003, 5086: 359–368.
- [13] Ye Shunliu, Zhi Shaolan, Sun Qibing, et al. Application of pseudo-random sequence in lidar ranging [C]//ICIECS, 2009: 5364645.
- [14] Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu, et al. Range accuracy limitation of pulse ranging systems based on Geiger mode single photon detectors [J]. *Applied Optics*, 2010, 49 (29): 5561–5566.
- [15] Philip Gatt, Steven Johnson, Terry Nichols. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics [J]. *Applied Optics*, 2009, 48 (17): 3261–3275.
- [16] Cantor B I, Teicht M C. Dead-time-corrected photon counting distributions for laser radiation [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1975, 65(7): 786–791.
- [17] Lars Sjoqvist, Christina Gronwall, Markus Henriksson, et al. Atmospheric turbulence effects in single-photon counting time-of-flight range profiling [C]//SPIE, 2008, 7115: 71150G–1.