

衰减片提高多脉冲 Gm-APD 激光雷达的探测性能

徐璐, 张宇, 张勇, 杨旭, 杨成华, 王强, 赵远

(哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 从 Gm-APD 的泊松统计的雪崩探测模型出发, 在长死时间情况下, 提出了一种提高 Gm-APD 激光雷达探测性能的方法。利用衰减片控制信号和噪声的强度, 实现了多脉冲探测 Gm-APD 激光雷达的探测概率、虚警概率和测距误差的提高。研究表明: 随着衰减片透过率的变化, 探测概率存在最大值, 测距误差存在最小值, 将衰减片透过率控制在 0.33~0.20 之间, 探测距离为 1.5 km 时, 探测概率能提高 1 倍, 测距误差可以从 m 量级提高到 cm 量级。

关键词: Gm-APD 激光雷达; 多脉冲探测; 衰减片; 探测性能

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0906003

Improvement of the detection performances of multiple pulses Gm-APD lidar by using an attenuator

Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong, Yang Xu, Yang Chenghua, Wang Qiang, Zhao Yuan

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the Poisson probability model of Gm-APD, in the long dead-time case, a new approach to improve the detection performances of Gm-APD lidar was proposed. The formulas of detection performances (detection probability, false alarm probability, and range error) of multiple pulses detection Gm-APD lidar were obtained and analyzed. By using an attenuator to control the intensity of signal and noise, the detection and false alarm probabilities, and range error of multiple pulses detection Gm-APD lidar were all improved. With the change of transmissivity of attenuator, the detection probability has a maximum, and the range error has a minimum. While the target is at the distance of 1.5 km, with the increase of the pulse number and the controlled transmissivity of attenuator between 0.33 and 0.20, the detection probability can be doubled with the sharp decline in false alarm probability, and the range error can be decreased from meters to centimeters.

Key words: Gm-APD lidar; multiple pulses detection; attenuator; detection performance

收稿日期: 2016-01-21; 修订日期: 2016-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(61450002); 国家青年基金(61108072)

作者简介: 徐璐(1988-), 男, 博士生, 主要从事光子计数激光雷达方面的研究。Email: xlhit@126.com

导师简介: 张宇(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信号检测的理论、激光探测的理论、光折变非线性光学方面的研究。Email: zhangyunn@hit.edu.cn

0 引言

三维成像的激光雷达探测器在军事、天文和测绘等领域中的应用越来越受到广泛的重视。盖革模式雪崩光电二极管(Geiger-mode avalanche photodiode, Gm-APD)具有单光子灵敏度,并且近十几年来得到了飞速发展,其作为激光雷达探测器的优势已经得到了国际上的一致认可^[1-3]。美国 MIT 林肯实验室(MIT Lincoln Laboratory)^[4-5] 和美国陆军实验室(US Army Research Laboratory)^[6] 是 Gm-APD 激光雷达领域的先驱和权威代表。

APD 工作在两端的反向偏压大于其雪崩击穿电压的模式下,即盖革模式,称此时的 APD 为 Gm-APD。Gm-APD 接收到单个光子并产生光电子,在反向偏压的作用下,迅速发生雪崩并输出一个饱和的雪崩脉冲信号。在发生一次雪崩事件之后,若保护抑制电路不采取任何措施,此时探测器将一直处于雪崩击穿状态直至损坏。因此,在探测器发生一次雪崩事件之后,保护抑制电路将会使探测器两端的反向偏压下降至雪崩击穿电压之下,探测器停止雪崩之后,再恢复到原来的状态等待下一次探测。在这段抑制、恢复时间中,探测器是不能对此时到达的光子有任何响应的,因此称这段时间为 Gm-APD 的死时间。Gm-APD 的死时间根据其采用的材料和保护抑制电路的不同,一般从 10 ns~1 μs。在 Gm-APD 激光雷达系统中,通常都会存在一个距离选通门。如果 Gm-APD 的时间与选通门的时间宽度差不多,探测器在选通门内最多只能产生一个雪崩脉冲,称为长死时间情况^[7];反之,对于短死时间情况,探测器在选通门内能产生多个雪崩脉冲。文中研究的是长死时间情况。

Johnson 等人首先提出了 Gm-APD 的信号和噪声的统计模型^[7]。他们将探测区间分割成许多离散的小区间,分析了 Gm-APD 的信号和噪声的分布,采用泊松统计理论计算 Gm-APD 在每个小区间内的雪崩概率。Fouche 理论研究了 Gm-APD 激光雷达在不同信号和噪声强度下的探测概率和虚警概率^[8]。首次提出了 Gm-APD 激光雷达多脉冲累积探测的探测概率和虚警概率。Henriksson 比较了单光子线性 APD 和盖革 APD 激光雷达的探测概率和虚警概率^[9]。

Kong 等人提出了一种自聚焦技术提高 Gm-APD 阵列激光雷达空间分辨率^[10]。他们还提出了采用两个 Gm-APD 迅速降低虚警概率的方法^[11]。国内光子激光雷达的发展也已经成为一种趋势^[12-16]。在之前的研究中,研究了 Gm-APD 激光雷达在长死时间情况下多脉冲探测概率和虚警概率^[17]。文中研究长死时间情况下,通过控制衰减片透过率范围,提高多脉冲 Gm-APD 激光雷达的探测概率、虚警概率和测距误差。

1 Gm-APD 激光雷达系统

图 1 为 Gm-APD 激光雷达系统框图。主时钟(Master Clock)同时给同步信号发生器(Sync Signal Generator)和数据采集系统(Data Acquisition)一个起始信号,同步信号发生器触发脉冲激光器发射激光脉冲。激光脉冲由发射光学系统(Transmitting System)照射到目标(Target)。目标反射的激光脉冲和视场内的背景光由接收光学系统(Receiving System)接收,经过窄带滤光片(NBPF)和可调衰减片(Attenuator),汇聚到 Gm-APD 的光敏面上。Gm-APD 产生雪崩脉冲信号,转换成高电平信号作为计时的截止信号。数据采集系统获得了脉冲的飞行时间,存储运算之后,由计算机(Computer)输出目标的距离像。在探测过程中,主时钟触发选通门控制系统(Strobing Gate Control),控制选通门的开启和关闭,目标落在选通门内^[18],Gm-APD 只能在选通门内有响应。

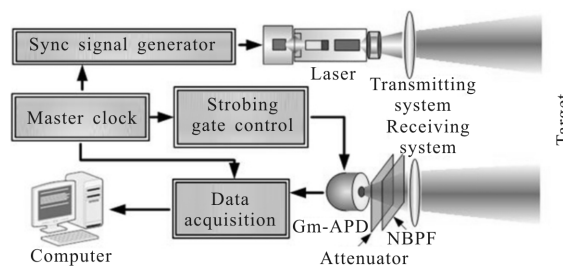


图 1 Gm-APD 激光雷达系统框图

Fig.1 Schematic diagram of Gm-APD lidar system

图 2 为 Gm-APD 激光雷达探测过程示意图。在研究分析中,将探测的时间轴根据计时时钟信号的周期宽度分割成一个个分立的小区间(Time bin)。激光器发射一个宽度为 300 ps 的高斯型脉冲,计时时

钟频率为 1 GHz, 周期为 1 ns, 因此整个激光脉冲将落在某个时钟周期内。在距离选通门内, Gm-APD 接收激光脉冲并产生初始信号光电子数和初始噪声光电子数。初始噪声光电子数包括背景噪声和探测器的热噪声, 平均分布在距离选通门内^[3]。Gm-APD 迅速产生饱和雪崩脉冲, 转换成高电平信号输出。

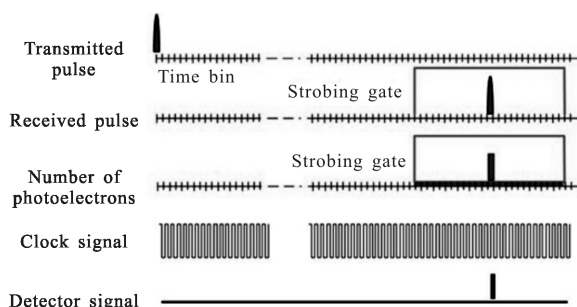


图 2 Gm-APD 激光雷达探测过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of detection process with Gm-APD lidar

2 理论研究

2.1 Gm-APD 的雪崩概率

对于 Gm-APD 探测器, 当计数率较小时, 探测过程服从泊松分布^[3]。在时间 $t_1 \sim t_2$ 之间, 产生 m 次雪崩事件的概率为:

$$P_m(t_1, t_2) = \frac{1}{m!} [M(t_1, t_2)]^m \exp[-M(t_1, t_2)] \quad (1)$$

式中: $M(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt$ 表示在探测器的探测时间 $t_1 \sim t_2$ 之间, 探测器产生的平均初始光电子数, $f(t)$ 表示这段时间探测器产生初始光电子数的平均速率。

在时间 $t_1 \sim t_2$ 内, 没有雪崩脉冲产生的概率为:

$$P_0(t_1, t_2) = \exp[-M(t_1, t_2)] \quad (2)$$

由于 Gm-APD 死时间的存在, 若在时间 $t_1 \sim t_2$ 内, 有雪崩脉冲产生, 必须保证在时间 $0 \sim t_1$ 内没有雪崩脉冲产生。因此, 在时间 $t_1 \sim t_2$ 内, Gm-APD 有雪崩脉冲产生的概率为:

$$P(t_1, t_2) = \exp[-M(0, t_2)] \cdot \{1 - \exp[-M(t_1, t_2)]\} \quad (3)$$

式中: $\exp[-M(0, t_2)]$ 表示在时间 $0 \sim t_1$ 内没有雪崩脉冲产生的概率, $1 - \exp[-M(t_1, t_2)]$ 表示在时间 $t_1 \sim t_2$ 内有雪崩脉冲产生的概率。

根据公式(3), 可以得到单脉冲单次探测过程中, Gm-APD 在每个小区间发生雪崩事件的概率, 如表 1 所示。 i 表示任意小区间的位置, T 表示目标区间的

位置, S 表示探测器接收到的从目标返回信号光电子数, G_0 和 G 分别示选通门开启和终止时刻所对应的区间位置, η 表示衰减片的透过率, n 和 n_0 分别表示在一个时钟周期内产生的平均背景噪声和热噪声。

表 1 在每个小区间内发生雪崩时间的概率

Tab.1 Probability of avalanche incident in each time-bin

Location of time-bin	Probability of avalanche incident
$1 \leq i < G_0$	$P_i = 0$
$G_0 \leq i < T$	$P_i = \exp[-(i - G_0)(\eta n + n_0)] \cdot [1 - \exp(-\eta n - n_0)]$
$i = T$	$P_i = \exp[-(T - G_0)(\eta n + n_0)] \cdot [1 - \exp(-\eta S - \eta n - n_0)]$
$T < i \leq G$	$P_i = \exp[-(i - G_0)(\eta n + n_0) - \eta S] \cdot [1 - \exp(-\eta n - n_0)]$
$i > G$	$P_i = 0$

2.2 单脉冲探测的探测性能

定义单脉冲探测的探测概率: 在目标区间发生雪崩事件的概率。得到:

$$PD_1 = P_T = \exp[-(T - G_0)(\eta n + n_0)] \cdot [1 - \exp(-\eta S - \eta n - n_0)] \quad (4)$$

PD_1 随着 η 发生变化, 对 η 求导, 令导数为零, 即 $\frac{dPD_1}{d\eta} = 0$, 计算得到:

$$\eta = \frac{\ln \frac{S + n + (T - G_0)n}{(T - G_0)n} - n_0}{S + n} \quad (5)$$

此时, PD_1 达到最大值。

定义单脉冲探测的虚警概率: 在非目标区间发生雪崩事件的概率。得到:

$$PFA_1 = 1 - P_T - \exp(-\eta S - \eta bn - bn_0) \quad (6)$$

式中: b 表示选通门开启的宽度。

根据平均值的定义, 得到系统测距的平均值:

$$\langle r \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} P_i \cdot i \Delta t c / 2}{\sum_{i=1}^{\infty} P_i} = \frac{\sum_{i=G_0}^G P_i \cdot i \Delta t c / 2}{\sum_{i=G_0}^G P_i} \quad (7)$$

根据方差的定义, 得到系统测距的方差:

$$(\Delta r)^2 = \frac{\sum_{i=G_0}^G P_i \cdot (i \Delta t c / 2)^2}{\sum_{i=G_0}^G P_i} \quad (8)$$

公式(4)、(6)、(8)分别为单脉冲探测的探测概率、

虚警概率和测距方差的表达式。探测性能的表达式中都含有衰减片透过率 η , 控制衰减片透过率 η 的变化, 探测性能将会发生变化。

2.3 多脉冲探测的探测性能

定义多脉冲探测时, 若某个区间产生的雪崩脉冲数目超过 $k/2$, k 为脉冲个数且文中为奇数^[8], 则输出此时的距离值。得到 3 个脉冲和 5 个脉冲探测时输出距离值在每个区间的概率:

$$P_i^{(3)} = P_i^3 + 3P_i^2(1-P_i) \quad (9)$$

$$P_i^{(5)} = P_i^5 + 5P_i^4(1-P_i) + 10P_i^3(1-P_i)^2 \quad (10)$$

定义 k 个脉冲探测时的探测概率: 系统在目标区间输出距离值的概率。得到 3 个脉冲和 5 个脉冲探测时的探测概率:

$$PD_3 = P_T^{(3)} = P_T^3 + 3P_T^2(1-P_T) \quad (11)$$

$$PD_5 = P_T^{(5)} = P_T^5 + 5P_T^4(1-P_T) + 10P_T^3(1-P_T)^2 \quad (12)$$

定义 k 个脉冲探测时的虚警概率: 系统在非目标区间输出距离值的概率。得到 3 个脉冲和 5 个脉冲探测时的虚警概率:

$$PFA_3 = \sum_{j=G_0}^G P_j^{(3)} - P_T^{(3)} \quad (13)$$

$$PFA_5 = \sum_{j=G_0}^G P_j^{(5)} - P_T^{(5)} \quad (14)$$

与单脉冲探测相同, 得到 k 个脉冲探测的测距平均值:

$$\langle r_k \rangle = \frac{\sum_{i=G_0}^G P_i^{(k)} \cdot i\Delta tc/2}{\sum_{i=G_0}^G P_i^{(k)}} \quad (15)$$

与单次探测相同, 得到 k 个脉冲探测的测距方差:

$$(\Delta r_k)^2 = \frac{\sum_{i=G_0}^G P_i^{(k)} \cdot (i\Delta tc/2)^2}{\sum_{i=G_0}^G P_i^{(k)}} - \langle r_k \rangle^2 \quad (16)$$

公式(11)~(14)、公式(16)分别为 3 个脉冲和 5 个脉冲探测时的探测概率、虚警概率和测距方差的表达式。探测性能的表达式中都含有衰减片透过率 η , 控制衰减片透过率 η 的变化, 探测性能将会发生变化。

3 仿真

从目标反射回的激光脉冲信号在 Gm-APD 上

产生的信号初始光电子数, 可以从激光雷达测距方程得到:

$$S = E_p \frac{\lambda}{hc} T_{\text{mit}} T_{\text{rec}} T_{\text{atm}}^2 \rho_L \frac{A}{2\pi R^2} \eta_q \quad (17)$$

式中: E_p 为激光脉冲能量, 目标的距离 R 为 1.5 km, 激光脉冲的波长 λ 为 532 nm, 普朗克常数 h 为 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, 大气中的光速 c 为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 发射光学系统的透过率 T_{mit} 为 0.7, 接收光学系统的透过率 T_{rec} 为 0.8, 目标与探测器间的大气透过率 T_{atm} 为 0.6, 目标表面的反射率 ρ_L 为 0.3, 接收光学系统的面积 A 为 $10^{-2}\pi/4 \text{ m}^2$ (直径 10 cm), 探测器的量子效率 η_q 为 0.5。

高斯脉冲的表达式为:

$$P(t) = P_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_{\text{pulse}}^2}\right) \quad (18)$$

式中: P_0 为高斯脉冲的峰值功率; σ_{pulse} 为高斯脉冲的宽度。高斯脉冲的能量根据公式(18)计算得到:

$$E_p = \int P(t) dt = P_0 \sqrt{2\pi} \sigma_{\text{pulse}}$$

高斯脉冲的峰值功率 P_0 为 200 W, 高斯脉冲的宽度 σ_{pulse} 为 300 ps, 计时时钟精度 Δt 为 1 ns; 选通门宽度 200 ns, 选通门开启时刻为 9.9 μs , 选通门关闭时刻为 10.1 μs , 目标处于选通门中间位置; 平均背景噪声取 8 MHz^[7], 即 n 为 0.008 ns^{-1} ; 热噪声取 100 kHz, 即 n_0 为 100 ns^{-1} 。

根据公式(4)、(11)、(12)得到单次探测和 3 次、5 次探测的探测概率随衰减片透过率的变化曲线, 如图 3 所示。探测概率随着衰减片透过率变化有一个最佳值, 随着探测次数增加, 探测概率增大。当 η 从 1 减小到 0.33 时, PD_1 从 0.45 达到最大值 0.68, PD_3 从 0.42 达到最大值 0.76, PD_5 从 0.40 达到最大值 0.81。

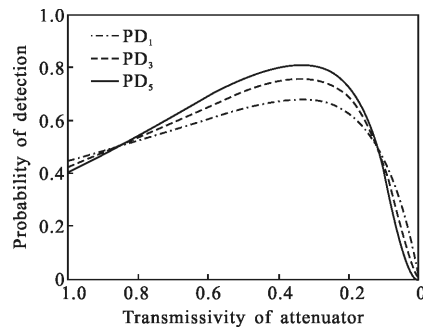


图 3 探测概率随衰减片透过率的变化

Fig.3 Probability of detection versus transmissivity of attenuator

根据公式(6)、(13)、(14)得到单次探测和 3 次、5 次探测的虚警概率随衰减片透过率的变化曲线,如图 4 所示。虚警概率随着衰减片透过率的减小而降低,随着探测次数增加,虚警概率降低很明显,3 次、5 次探测的虚警概率达到 10^{-2} 以下,可以忽略。当 η 从 1 减小到 0 时, PFA_1 从 0.55 减小到 0.02。

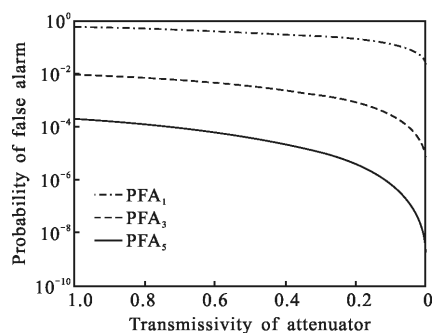


图 4 虚警概率随衰减片透过率的变化

Fig.4 Probability of false alarm versus transmissivity of attenuator

根据公式(8)、(16)得到单次探测和 3 次、5 次探测的测距误差随衰减片透过率的变化曲线,如图 5 所示。测距误差随着衰减片透过率变化也有一个最小值,随着探测次数增加,测距误差有很大提高。当 $\eta=1.00$ 时, Δr_1 为 5.26 m, Δr_3 为 1.50 m, Δr_5 为 0.24 m, 当 $\eta=0.12$ 时,测距误差 Δr_1 达到最小值 4.02 m; 当 $\eta=0.06$ 时,测距误差 Δr_3 达到最小值 0.21 m; 当 $\eta=0.05$ 时,测距误差 Δr_5 达到最小值 0.01 m。

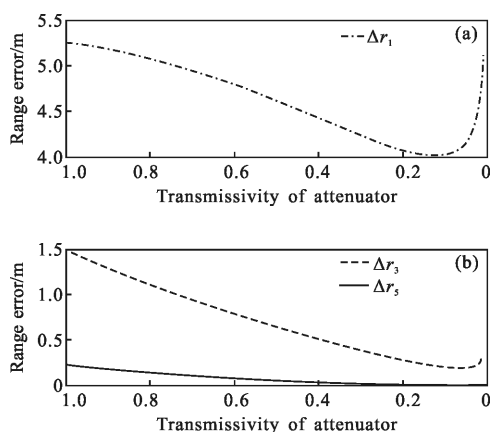


图 5 测距误差随衰减片透过率的变化

Fig.5 Range error versus transmissivity of attenuator

探测概率和测距误差处于最佳值时的 η 各不相同,理论上测距误差可以达到最小值,但是此时的探测概率将会降到很低,绝大多数的探测将出现无效

探测。在探测过程中,首先保证能够得到较大的探测概率,再考虑提高测距误差,可将衰减片透过率控制在 0.33~0.20 之间。例如,衰减片的透过率控制在 $\eta=0.30$, 此时, $PD_1=0.68$, $PD_3=0.75$, $PD_5=0.80$, $\Delta r_1=4.23$ m, $\Delta r_3=0.40$ m, $\Delta r_5=0.03$ m。

4 结 论

文中介绍了 Gm-APD 激光雷达的系统及其探测过程。根据 Gm-APD 的泊松统计的雪崩模型,在长死时间情况下,提出了一种新颖的方法,利用衰减片控制信号和噪声的强度,实现了 Gm-APD 多脉冲 Gm-APD 激光雷达的探测概率、虚警概率和测距误差的提高。研究发现 Gm-APD 激光雷达的作用距离在 1.5 km 时,多脉冲累积探测时,将衰减片透过率控制在 0.33~0.20 之间,能够使 Gm-APD 激光雷达的探测概率提高一倍,与此同时虚警概率下降到忽略不计,测距误差从 m 量级提高到 cm 量级。

参 考 文 献:

- [1] Heinrichs R M, Aull B F, Marino R M, et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays [C]//SPIE, 2001, 4377: 106-117.
- [2] Marino R M, Davis W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Linc Lab J*, 2005, 15(1): 23-36.
- [3] Oh M S, Kong H J, Kim T H, et al. Time-of-flight analysis of three-dimensional imaging laser radar using a geiger-mode avalanche photodiode[J]. *Jpn J Phys*, 2010, 49: 026601.
- [4] Marino R M, Davis W R, Rich G C, et al. High-resolution 3D imaging laser radar flight test experiments [C]//SPIE, 2005, 5791: 138-151.
- [5] Marino R M, Richardson J, Garnier R, et al. Photon-counting lidar for aerosol detection and 3-D imaging[C]//SPIE, 2009, 7323: 73230H.
- [6] Redman B, Ruff W, Mark Giza. Photon counting chirped AM lidar: concept, simulation, and initial experimental results[C]//SPIE, 2006, 6214: 62140P.
- [7] Johnson S, Gatt P, Nichols T. Analysis of Geiger-mode APD laser radars[C]//SPIE, 2003, 5086: 359-368.
- [8] Fouche D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. *Appl Opt*, 2003, 42(27): 5388-5398.

- [9] Henriksson M. Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(24): 5140–5147.
- [10] Oh M S, Kong H J, Kim T H, et al. Autofocus technique for three-dimensional imaging, direct-detection laser radar using Geiger-mode avalanche photodiode focal-plane array [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(24): 4214–4216.
- [11] Kong H J, Kim T H, Jo S E, et al. Smart three-dimensional imaging lidar using two Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Opt Express*, 2011, 19(20): 19323–19329.
- [12] Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu, et al. Theoretical analysis of influence of laser signal strength on range precision in single photon ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2771–2775. (in Chinese)
王飞, 赵远, 张宇, 等. 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2771–2775.
- [13] 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): 3234–3238. (in Chinese)
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]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3234–3238.
- [14] Zhang Guoqing, Liu Lina, Zhu Changjun. Detection and false-alarm probabilities based on multi-pixel photon counter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (7): 1819–1824. (in Chinese)
张国青, 刘丽娜, 朱长军. 采用多像素光子计数器的探测概率与虚警率 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42 (7): 1819–1824.
- [15] He Wei, Sima Boyu, Miao Zhuang, et al. Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21 (10): 2488–2494. (in Chinese)
何伟基, 司马博羽, 苗壮, 等. 光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2488–2494.
- [16] Bu Shaofang, Ni Qiliang, He Lingping, et al. Microchannel plate photon counting detector in UV range [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 302–309. (in Chinese)
卜绍芳, 尼启良, 何玲平, 等. 极紫外波段微通道板光子计数探测器 [J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 302–309.
- [17] 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 of Lasers*, 2012, 39(4): 0414003. (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.
- [18] Wu L, Zhao Y, Zhang Y, et al. Multipulse gate-delayed range gating imaging lidar [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(8): 1365–1367.