

用于机载远程测距的单光子探测关键技术仿真研究

袁帅映^{1,2}, 羊毅², 董涛², 郝培育²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 机载微脉冲激光测距是一种新体制的激光测距技术, 通过采用单光子回波探测来实现远程测距。针对机载远程测距的应用需求, 对激光回波信号、背景光特性进行了理论研究和数值计算, 并完成了设计参数的仿真优化。将空间滤波和光谱滤波组合使用, 有效地抑制了背景光噪声, 实现了 100 km 的远程测距; 通过双通道分光, 大幅度提高了测距的动态范围, 将测距盲区减小到 500 m。实验表明, 微脉冲激光测距系统能够有效探测 500 m ~ 100 km 距离内的目标回波, 探测概率 P_D 不小于 96%, 虚警率 P_{FA} 不大于 0.3%。

关键词: 机载远程激光测距; 单光子探测; 背景光噪声抑制; 探测概率

中图分类号: V271.4; TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0080-05

Simulation of Key Technologies of Single Photon Detection for Airborne Long-Distance Ranging

YUAN Shuai-ying^{1,2}, YANG Yi², DONG Tao², HAO Pei-yu²

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: Micro-pulse laser ranging is a new technique of laser ranging, which can achieve long-distance ranging by detecting the echo signal of a single photon. According to the requirement of long-distance laser ranging for airborne application, we made theoretical study and numerical calculation to laser echo signal and background light, and accomplished the simulation optimization of design parameters. The background light noise is suppressed effectively by using spectral filtering together with spatial filtering, and 100 km remote ranging is achieved. Through light splitting, the dynamic range of distance measurement is improved greatly, and the ranging blind zone is decreased to 500 m. The experimental result verified that micro-pulse laser ranging system can detect the echo signal between 500 m and 100 km effectually, the detection probability P_D is not lower than 96% and false alarm probability P_{FA} is not bigger than 0.3%.

Key words: airborne long range laser ranging; single photon detection; suppression of background light; detection probability

0 引言

激光测距系统因体积小、测程远、精度高等优点被广泛应用于机载测距系统。随着作战飞机陆续装备远程精确打击武器, 现代空战要求载机具有超视距和高精度的作战能力, 依靠高脉冲发射和高信噪比检测的传统单脉冲和多脉冲激光测距技术已不能满足未来的作战要求。以量子理论为基础的微脉冲激光测

距技术逐渐兴起, 它采用低能量、高重复频率的发射脉冲, 高灵敏度的单光子探测器和时间相关光子计数技术^[1], 能够达到单光子量级的探测灵敏度, 在卫星激光测距^[2-3]、大气监测^[4]等应用方面已有较深入的研究。

机载激光测距系统的测距范围较大, 一方面要能够实现远程测距, 另一方面要有较小的测距盲区。远程测距时回波信号十分微弱, 而背景光很强, 完全湮没了回波信号; 近程测距时回波信号很强, 容易损坏探测器。通过对回波信号特性和背景噪声的数值仿真计算, 对系统参数优化设计, 实现远程测距和较小的测距

盲区。

1 激光回波信号量子特性的理论分析

微脉冲激光测距系统的发射激光能量很小, 远程测距时回波信号十分微弱, 达到了光子量级, 表现出量子特性。因此, 微脉冲激光测距采用基于量子理论和统计理论的光子计数法, 通过分析返回光子数的统计特性给出目标距离的信息^[5]。

1.1 回波信号和背景光

微脉冲激光测距将回波功率的计算转化成回波光子数的计算, 根据激光雷达测距方程^[6], 经目标反射到达探测器的回波光子数为

$$n_s = \frac{4E_T \eta_T \eta_r \rho A_r A_s \cos \theta}{\pi^2 h\nu \theta_r^2 R^4} T_a^2 \quad (1)$$

式中: E_T 为发射激光单脉冲能量; η_T 为发射光学系统透过率; η_r 为接收光学系统的透过率; ρ 为目标表面的反射率; A_r 为接收光学系统有效接收面积; A_s 为目标反射面积; θ 为目标反射面法线与发生系统光轴的夹角; $h\nu$ 为发射激光中单个光子的能量; θ_r 为发射激光的束散角; R 为激光测距系统与目标的距离; T_a 为单程大气透过率。

由式(1)可以看出, 测距系统测程的四次方与能够接收的最小光子数成反比。若要增大最大测程, 需要减小系统能够探测到的最小光子数。

激光测距系统在接收回波信号的同时会接收到背景光噪声, 其主要由目标对太阳光的反射和太阳光的大气散射两部分组成。将目标看作朗伯散射面, 漫反射系数为 ρ , 目标完全在接收视场内, 到达探测器的背景噪声光子数为

$$n_b = \left[\frac{\pi}{16h\nu} (T_a \rho H_\lambda \cos \alpha \cos \varphi + \pi N_\lambda) \right] \times (\eta_r \theta_r^2 d_r^2 \Delta \lambda) \quad (2)$$

式中: H_λ 为太阳光对地面的光谱辐射照度; N_λ 为太阳光大气散射的光谱辐射亮度; α 为太阳射线和目标表面法线的夹角; φ 为目标表面法线与接收光轴之间的夹角; η_r 为接收光学系统的透过率; θ_r 为接收视场角; d_r 为接收光学系统的物镜直径; $\Delta \lambda$ 为窄带滤光片的光谱带宽。

1.2 探测概率和虚警率

有效探测到回波信号需要满足两个条件: 1) 在回波信号到达之前, 没有光子触发探测器; 2) 在回波信号到达时刻, 探测器响应。设触发探测器的时刻总光子数为 N , 探测器探测阈值为 K , 回波到达时刻为 t , 则回波信号探测如图 1 所示。

在一个脉冲周期内对 t 时刻的回波光子实现有效探测的概率 P_d 为^[7-8]

$$P_d = P([t_0, t], N=0) \times P(t, N \geq K) = \exp[-M(0, t)] \times \{1 - \exp[-M(t)]\} \quad (3)$$

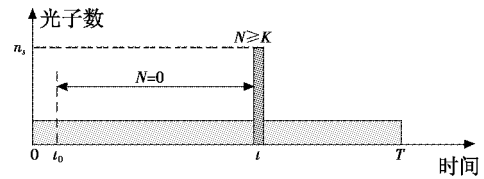


图 1 回波信号探测示意图

Fig. 1 The schematic diagram of echo signal detecting

通过降低探测器的工作温度可以有效减少其暗计数, 当对探测器制冷达到 -40°C 时, 暗计数只有几十赫兹^[9], 可以忽略。总接收光子数可看成信号光子和背景光子之和, 即 $N = n_s + n_b$ 。信号光子和背景光子引发探测器产生主要电子的过程也都服从泊松统计分布^[10-11]。探测器能够对单个光子响应, 探测阈值 $K = 1$ 。将 N 和 K 代入, 则式(3)可以转化成

$$P_d = e^{-n_s} [1 - e^{-(n_s + n_b)}] \quad (4)$$

假设对 L 个周期的回波信号进行累加, 超过阈值 K_{th} 的认为是回波信号, 则系统的探测概率 P_D 为^[12-13]

$$P_D = P(K \geq K_{th}) = \sum_{K=K_{th}}^L C_L^K P_d^K (1 - P_d)^{L-K} \quad (5)$$

单周期的虚警率 P_f 和累加后系统的虚警率 P_{FA} 可表示为

$$P_f = 1 - P_d - \exp(-n_b - n_s) \quad (6)$$

$$P_{FA} = \sum_{K=K_{th}}^L C_L^K P_f^K (1 - P_f)^{L-K} \quad (7)$$

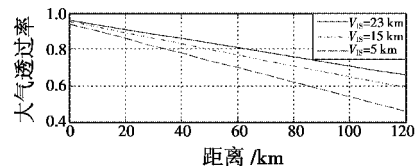
2 回波信号特性的数值仿真计算

2.1 大气传输特性对回波信号的影响

激光在大气传输过程中会受到大气吸收、散射等的影响而衰减, 大气对激光的衰减主要通过大气对激光的透过率来体现。大气透过率主要与能见度、高度和距离有关。

能见度的高低影响着激光在大气中的透过率, 能见度越高, 大气散射系数就越小, 对激光的衰减也就越小。用 Lowtran 7.0 进行仿真, 选择中纬度夏季标准大气模型, 水平路径, 中心波长 532 nm, 得到在不同能见度下的大气透过率与距离的关系, 并通过式(1)计算回波光子数的范围。

不同能见度下大气透过率和回波光子数与距离的关系如图 2 所示。



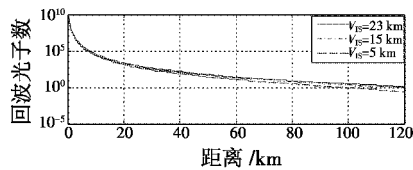


图 2 不同能见度下大气透过率和回波光子数与距离的关系

Fig. 2 Atmospheric transmittance and photon number of echo vs range at different visibility

由图 2 可以看出,随着测距距离的增加,大气透过率呈下降趋势;在相同测距距离条件下,能见度越高,大气透过率也越大,回波光子数也就越大。

海拔高度对大气透过率有很大的影响,海拔越高,大气环境越为纯净,对激光的衰减也就越小。用 Lowtran 7.0 进行仿真,选择中纬度夏季标准大气模型,水平路径,中心波长 532 nm,得到在不同高度下的大气透过率与距离的关系。

不同高度下大气透过率和回波光子数与距离的关系如图 3 所示。

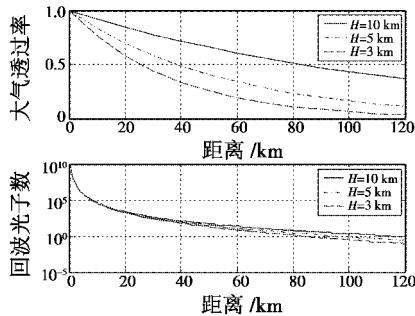


图 3 不同高度下大气透过率和回波光子数与距离的关系

Fig. 3 Atmospheric transmittance and photon number of echo vs range at different height

由图 3 可以看出,同一高度时,随着距离增加,透过率逐渐减小,且衰减速率变缓;相同的测距条件下,飞行高度越高,大气透过率越高,回波光子数也就越大。

2.2 激光传输路径对回波信号的影响

机载激光测距系统要能够对空中目标和地面目标进行测距。空空测距时,激光传输为水平路径,空地测距时,激光传输为斜路径。

当激光发射脉冲波长为 532 nm,单脉冲能量为 10 mJ;接收光学系统有效接收直径选择为 120 mm;目标反射面积为 1.2 m²,能见度 15 km,飞行高度 5 km,不同的测距情况下回波信号的特性如图 4 所示。

由图 4 可以看出,空地测距和空空测距相比,回波强度较弱,且随着距离的增加衰减速率增加。

空空测距时,目标距离小于 14 km 时,回波光子数大于 10⁴ 个,超过了探测器能够承受的峰值光强度,会损坏探测器。一般要求测距盲区不大于 500 m,500 m 处的回波光子数高达 10⁹ 个;而在 100 km 处,平均回波光

子数在 1~4 个。

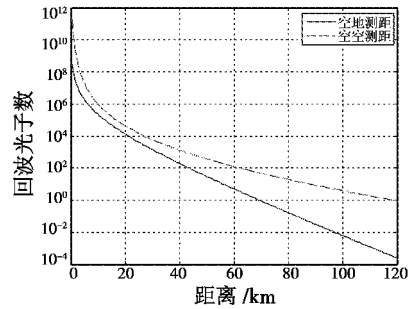


图 4 不同测距路径时回波光子数与距离的关系

Fig. 4 Photon number of echo vs range with different ranging path

3 背景光噪声特性分析及抑制方法研究

3.1 背景光噪声数值仿真

激光测距系统接收到的背景光噪声主要由目标对太阳光的反射和太阳光的大气散射两部分组成^[14]。

使用 MODTRAN 4.0 软件,对水平路径上太阳光的大气散射光谱辐射亮度 N_λ 和对地面的光谱辐射亮度 H_λ 进行数值仿真。选择条件为中纬度夏季,中心波长 532 nm,地面反射率 0.4,地面能见度 15 km,初始高度 5 km,终点高度 5 km,太阳天顶角 45°。太阳光的大气散射光谱辐射亮度和太阳对地面的光谱辐照度如图 5 所示。

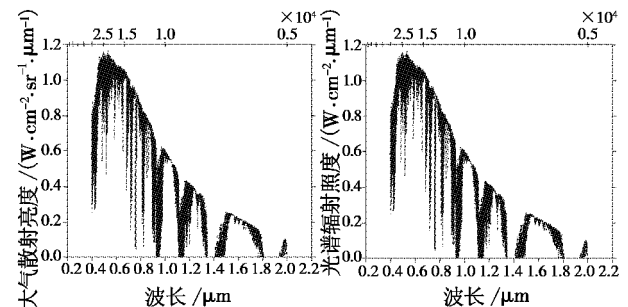


图 5 太阳光的大气散射亮度和对地面的光谱辐射照度

Fig. 5 Atmospheric scattering luminance of sunlight and its spectral radiant luminance on the ground

根据图 5 的仿真结果得到, N_λ 为 $0.72 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, H_λ 为 $1.13 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

若将接收视场限制在毫弧度量级,窄带滤光片带宽限制在纳米量级,计算得到的背光光子数在 10⁶ 量级,而 100 km 处回波信号只有少数光子,完全湮没在背景光噪声中。因此,要从较强的背景光噪声中有效地检测出微弱的回波信号,就必须对背景光进行大幅抑制。

3.2 背景光噪声抑制方法研究

通常,在接收端可以通过光谱滤波、空间滤波和时间滤波来抑制背景光子数^[15]。最有效的光谱滤波方法就是在探测器前加一个窄带滤光片,能够有效抑制中心波长之外的背景光;空间滤波即减小接收视场

(FOV),能够减小背景光光子计数,但是过小的接收视场很难保证回波信号的质量;时间滤波通过预知目标位置控制探测器打开时间,减少背景光子计数。

采用单一的背景噪声抑制方法对背景噪声的抑制作用有限,通常把几种方法组合使用,以达到较好的抑制效果。将光谱滤波和空间滤波组合使用,研究其对背景噪声的抑制作用。

将太阳对地面的光谱辐照度 H_λ 和太阳光的大气散射光谱辐射亮度 N_λ 代入式(2)中,采用不同带宽和接收视场时背景噪声光子数如图 6 所示。

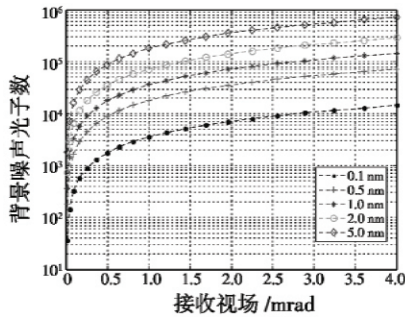


图 6 背景光光子数与接收视场和滤光片带宽的关系

Fig.6 Photon number of background light vs bandwidth of filtering and receive FOV

在接收视场为 0.1 mrad,滤光片带宽为 0.1 nm 时,背景光光子数可以被抑制到每毫秒 0.169 6,能够满足远程测距时对微弱回波信号的有效探测。

对于空空测距,采用空间滤波法抑制背景光噪声时,一般取接收视场角略小于或等于激光发散角^[14];采用光谱滤波时,窄带滤光片越窄,对发射激光波长的稳定性要求越高,窄带滤光片中心波长的温漂特性表现得越明显,对接收系统的透过率影响越大。

4 测距性能的仿真及验证

4.1 远程测距回波信号探测及最大测程仿真计算

根据式(4)和式(5)计算,在测程为 100 km 时,若要满足系统探测概率 $P_D \geq 95\%$,单周期的探测概率 $P_d \geq 42.9\%$,背景光噪声光子数 N_b 小于等于每毫秒 0.84。由图 6 中数据可得,有多种接收视场和滤光片带宽组合能够满足要求。

不同参数时系统探测概率和虚警率如表 1 所示。

表 1 不同参数时系统探测概率和虚警率

Table 1 Detection probability and false alarm of system with different parameters

滤光片带宽/nm	接收视场/mrad	探测概率/%	虚警率/%
0.5	0.1	≥ 97.8	≤ 0.1
1.0	0.1	≥ 96.3	≤ 0.3
0.1	0.2	≥ 97.5	≤ 0.1
0.5	0.2	≥ 96.3	≤ 0.3

由表 1 可以看出,在接收视场为 0.1 mrad、滤光片带宽为 1.0 nm 和接收视场为 0.2 mrad、滤光片带宽为 0.5 nm 时,均能将背景光噪声光子数抑制到每毫秒 0.785 5,系统探测概率大于 96%。

接收视场为 0.1 mrad 时,对系统指向精度和发射接收光学系统的同轴精度有较高要求,结合实际情况,选择接收视场为 0.2 mrad,相应的滤光片带宽为 0.5 nm。窄带滤光片的中心波长随温度的变化会产生漂移,因此将窄带滤光片放置在恒温槽中,保持温度恒定。

4.2 近程测距回波信号探测及测距盲区仿真计算

为了减小测距盲区,使用分光镜将回波信号分为强弱两束^[16],压缩近程测距的回波强度,实现对近程测距回波的有效探测。根据图 4 中的计算数据,选择近场范围为 500 m ~ 18 km,远场范围为 14 ~ 100 km,近远场通道采用 1/999 的分光比。分光前后近远场通道回波光子数范围见表 2。

表 2 近远场回波光子数

Table 2 Photon number for near and far field

距离范围	回波光子数	分光后光子数
500 m ~ 3 km	$5.38 \times 10^9 \sim 4.145 \times 10^6$	$5.38 \times 10^6 \sim 4.15 \times 10^3$
3 ~ 18 km	$4.15 \times 10^6 \sim 3.20 \times 10^3$	4150 ~ 3.20
14 ~ 100 km	8746 ~ 3.36	8737 ~ 3.36

经过分光,探测器对近场 3 ~ 18 km 和远场 14 ~ 100 km 的回波光均能实现正常探测。近场通道 500 m ~ 3 km 的范围内回波光子数仍然很强;远场通道 500 m ~ 3 km 最小回波功率在 10^{-5} W 左右,工作在线性模式的 APD 就能够对其进行响应。通过时序控制两个通道探测器的开关和工作模式,控制时序如图 7 所示。

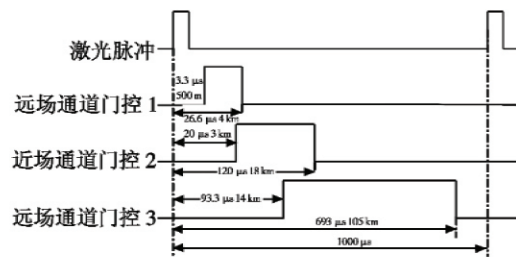


图 7 探测器电压控制时序

Fig.7 Control sequence of bias for different detectors

4.3 实验结果

系统发射激光单脉冲能量 10 mJ,激光发散角 ≤ 0.3 mrad,接收视场为 0.2 mrad,滤光片带宽为 0.5 nm,近远场通道分光比为 1/999,探测器选用 Si-APD,工作在盖革模式下,量子效率 50%。

光子计数卡采集的部分数据如图 8 所示。

系统最大测程 106 km,测距盲区最小 480 m。对 500 m ~ 100 km 内目标的探测概率达到 96%,虚警率小于 0.3%,实现远程测距的同时测距盲区较小。

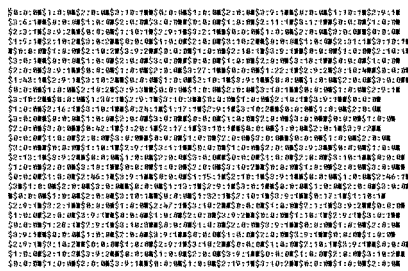


图8 光子计数卡采集数据

Fig. 8 Data collected by photon counting card

5 结论

将空间滤波和光谱滤波组合使用,选择滤光片带宽为0.5 nm,接收视场为0.2 mrad,能够有效抑制背景光噪声,实现对100 km目标的有效测距;使用分光,采用近远场通道,压缩近距测距的强回波信号,实现500 m的小测距盲区。通过实验验证了微脉冲激光测距系统能够对500 m~100 km内测距回波信号进行有效探测。

参考文献

[1] 侯利冰,黄庚华,况耀武,等.光子计数激光测距技术研究[J].科学技术与工程,2013,13(18):5186-5190. (HOU L B, HUANG G H, KUANG Y W, et al. Research of photon counting laser ranging technology[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(18): 5186-5190.)

[2] 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. (ZHANG Z P, ZHANG H F, WU Z B, et al. kHz repetition satellite laser ranging system with high precision and measuring results[J]. Chinese Science Bull, 2011, 56(15): 1177-1183.)

[3] 韩光宇,翟锋,郭劲,等.卫星激光测距中白天测距的分析与实现[J].仪器仪表学报,2012,33(4):885-890. (HAN G Y, ZHAI F, GUO J, et al. Analysis and realization of day-time ranging of SLR[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4): 885-890.)

[4] 杜立彬,王章军,陈超,等.微脉冲激光雷达系统实验观测及应用[J].量子电子学报,2013,30(1):84-88. (DU L B, WANG Z J, CHEN C, et al. Development and applications of micropulse lidar[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 84-88.)

[5] 田玉珍,赵帅,郭劲.非合作目标光子计数激光测距技术研究[J].光学学报,2011,31(5):138-145. (TIAN Y Z, ZHAO S, GUO J. Analysis of non-cooperation target photon counting laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 138-145.)

[6] 戴永江.激光雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2010:179-180. (DAI Y J. Technology of lidar[M]. Bei-

jing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 179-180.)

[7] CHEN Y F, HE W J, MIAO Z, et al. Single photon ranging system using two wavelengths laser and analysis of precision[C]//Proc. of SPIE, 2013. doi:10.1117/12.2034467.

[8] 罗韩君,詹杰,丰元,等.基于盖革模式APD的光子计数激光雷达探测距离研究[J].光电工程,2013,40(12):80-88. (LUO H J, ZHAN J, FENG Y, et al. Detection range of photon counting laser radar based on Geiger-mode APD[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(12): 80-88.)

[9] KIM Y S, JEONG Y C, SAUGE S, et al. Ultra-low noise single-photon detector based on Si avalanche photodiode[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(9). doi: 10.1063/1.3641294.

[10] 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. (WANG F, ZHAO Y, ZHANG Y, 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.)

[11] 王弟男,陈长青,王挺峰.盖革模式雪崩光电二极管光子计数探测原理研究[J].激光与光电子学进展,2012(12):83-88. (WANG D N, CHEN C Q, WANG T F. A study on photon counting detection principle of Geiger-mode avalanche photodiode[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012(12): 83-88.)

[12] ZHANG Z J, ZHAO Y, ZHANG Y, et al. A high detection probability method for Gm-APD photon counting laser radar[C]//Proc. of SPIE, 2013. doi:10.1117/12.2034694.

[13] 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):200-205. (XU L, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 200-205.)

[14] 郭赛,丁全心,羊毅.雪崩光电探测器的噪声抑制技术研究[J].电光与控制,2012,19(3):69-73. (GUO S, DING Q X, YANG Y. Noise suppression technologies used for avalanche photodiode[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(3): 69-73.)

[15] PFENNIGBAUER M, ULLRICH A. Applicability of single photon detection for laser radar[J]. Elektrotechnik & Informationstechnik, 2007, 124(6): 180-185.

[16] RAZNKOV I. Characterization of a Geiger-mode avalanche photon detector for high spectral resolution lidar[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2010.