单光子测距系统仿真及精度分析

刘骋昊,陈云飞,何伟基,顾国华,陈 钱

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094)

摘 要: 单光子探测器和时间相关单光子计数技术(TCSPC)被广泛运用于脉冲式激光测距及三维成像系统中。分析影响探测精度的因素有助于提高测距系统的性能。为此,建立了基于 TCSPC 单光子测距系统的理论模型,讨论分析了影响测距系统测量精度的因素,主要包括激光脉冲强度和回波信号统计波形的脉宽,其中后者由激光脉宽和探测器的时间抖动决定。并且利用蒙特卡洛法对测距系统的探测过程进行仿真,得到了上述因素对测量精度的具体影响情况。最后搭建了单光子测距的实验室实验系统,经过实验在 10 m 处的测量精度达到 4 mm,对相同参数下的仿真结果进行了验证。

关键词: 测距精确度; 激光雷达; 时间相关单光子计数; 蒙特卡洛仿真

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0382-06

Simulation and accuracy analysis of single photon ranging system

Liu Chenghao, Chen Yunfei, He Weiji, Gu Guohua, Chen Qian

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Single-photon detectors and time-correlated single-photon counting techniques have been widely used in pulse laser ranging system and three-dimensional imaging systems. Analyzing the factors influencing detection precision will improve the performance of ranging system. In this paper, a theoretical model of single photon ranging system based on TCSPC was established and the main factors affecting the accuracy was analyzed. The main factors included laser pulse intensity and pulse width of echo signal statistics waveform and the latter depended on laser pulse width and time jitter of detector. And simulation of the detection process by Monte Carlo method was used to get the specific influence of the above factors on measurement accuracy. Finally, an experimental single photon ranging system is built in lab. The system has an accuracy of 4 mm about the target 10 m away by experiment and the accuracy verifies the simulation results under the same parameters.

Key words: range accuracy; Ladar; TCSPC; Mento Carlo simulation

收稿日期: 2013-06-15; **修订日期:** 2013-07-08

基金项目: 微光夜视技术重点实验室开放基金(J110508);国家自然科学基金(61101196)

作者简介: 刘聘昊(1991-),男,主要从事光子通信与应用方面的研究。Email:age_1991@163.com

导师简介: 何伟基(1981-),男,讲师,博士,主要从事微光成像器件机理及应用方面的研究。Email:njustheweiji@163.com

0 引　言

激光雷达被广泛运用于卫星测距、三维成像等军事和民用领域。脉冲式激光雷达测距系统通过发出激光脉冲，测量激光同步信号或参考信号与目标返回信号的时间差来间接测定目标的距离。

目前脉冲式激光雷达测距系统最大的不足是需要足够大的回波能量来确保探测精度。引入时间相关单光子计数(TCSPC)技术探测回波信号，可以减小对脉冲能量的要求，增加测距距离和提高测距精度。TCSPC 是一项统计采样技术，具有单光子灵敏度以及皮秒级别时间分辨率[1-2]。测量精度是单光子测距系统的重要指标之一，根据前人的研究，很多因素都会影响测量精度[3-6]：单光子探测器在一个脉冲周期里只响应一次，回波信号与噪声都有可能激励探测器，因此，回波信号的强度直接影响探测效率及精度。另外，激光脉冲有一定宽度，当回波信号不强时，激光脉冲光子序列前端和后端的光子都有可能激发探测器，从而使得探测精度受到影响。

根据单光子探测器的工作过程，其存在的时间抖动特性，使得探测器的输出电流脉冲与实际响应时间存在一定误差，间接影响测量精度。笔者使用蒙特卡洛法对探测过程进行仿真，模拟整个探测过程，重复多脉冲探测，累加得出理想的回波信号距离直方图。对理论模型及仿真结果进行分析，得到回波信号强度、激光脉宽和探测器时间抖动对测距精度的具体影响。

1 系统探测模型

1.1 激光模型

激光脉冲强度直接影响系统的探测精度，同时激光脉冲存在着一定的脉冲宽度和能量分布。使用激光的标准模型作为理论模型和仿真的输入。激光模型由公式(1)给出[3]：

$$s(t)=\frac{t}{\tau}\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{n}\right] \tag{1}$$

式中：参数 n 决定激光的模型，对于普通的调 Q 激光，取 n=1 较适合。对于 n=1，激光的半波宽与 τ 的关系为：$P_{\mathrm{FWHM}}=3.5\tau$，公式(1)中，$s(t)$的积分为：

$$\int_0^{\infty} s(t)\mathrm{d}t=\int_0^{\infty}\frac{t}{\tau}\exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)\right)\mathrm{d}t=\tau \tag{2}$$

激光标准波形如图 1 所示。

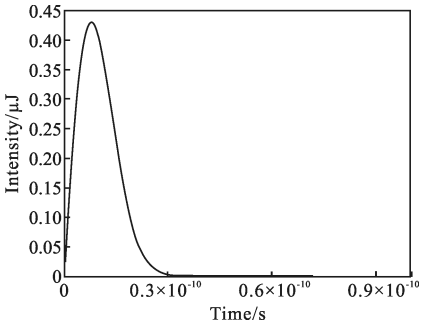

图 1 激光标准波形(激光脉宽为 100 ps)

Fig.1 Standard laser pulse shape(laser pulse width is 100 ps)

1.2 探测接收模型

单光子测距系统使用的探测器件为硅单光子雪崩二极管(SPAD)，具有单光子灵敏的特性。SPAD 工作在盖革模式下[7]，工作电压高于器件击穿电压，器件倍增区域由于自由载流子的注入，促使器件内部倍增机制被启动，SPAD 的输出电流迅速增加，在短时间内形成有效脉冲信号，完成 SPAD 探测器激发。将此注入的自由载流子称为原电子。SPAD 的激发取决于器件内部两个随机过程：原电子的产生和载流子雪崩倍增。其中原电子的产生主要有以下三种方式：经过目标反射回来的激光光子、背景噪声光子以及内部热噪声(暗电流)。对每个激光脉冲，探测只激发一次或者不激发。

在主动激光雷达探测中，到达探测器的原电子数量满足负指数分布[8]。当接收到的光子数目远小于光斑光子分布时，这种负指数分布可以很好地用泊松分布近似代替[3,9]。探测过程中，在 t_1 到 t_2 时间段内，产生不少于一个原电子(事件 m)发生的概率为：

$$P_m(t_1,t_2)=\frac{1}{m!}[M(t_1,t_2)]^m\exp[-M(t_1,t_2)] \tag{3}$$

$$M(t_1,t_2)=\int_{t_1}^{t_2}f(t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：$f(t)$为这个过程的函数表达。由公式(3)得到，在 t_1 到 t_2 时间段内没有产生原电子和产生一个或多个原电子的概率分别为：

$$P_0(t_1,t_2)=\exp[-M(t_1,t_2)] \tag{5}$$

$$P(t_1,t_2)=\exp[-M(0,t_1)]\{1-\exp[-M(t_1,t_2)]\} \tag{6}$$

1.3 探测器时间抖动模型

对于 SPAD，其激发不仅取决于原电子的产生，还取决于载流子雪崩倍增。由于器件内部倍增过程

的随机特性，原电子激励 SPAD 内部倍增机制后，输出的电流脉冲在强度、相位方面有所差异，这就导致后续时刻鉴别电路检出时刻存在时间抖动，即实际激发时间与输出信号时间存在误差，为 SPAD 的时间抖动。不同探测器的时间抖动指标有所差异，从 100 至几百皮秒不等。这种光子到达时间与探测器激发存在的误差，近似服从泊松分布。

2 系统仿真

2.1 仿真算法

将时间轴分为等间距的时间区间 τ_{bin}。根据激光脉冲标准波形，得到每个时间区间内对应的激光强度。为此，将激光波形归一化：

$$令\ p(t)=\frac{1}{\tau}s(t)=\frac{1}{\tau}\frac{t}{\tau}\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \tag{7}$$

$$则\int_0^{\infty}p(t)\mathrm{d}t=\int_0^{\infty}\frac{1}{\tau}\frac{t}{\tau}\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\mathrm{d}t=1 \tag{8}$$

忽略大气、目标形状的影响，可以认为目标反射的回波信号与原始激光脉冲相比，只存在能量的差异。考虑回波信号脉冲，则 i 时间区间内包含的光子数为：

$$L(i)=N_L\int_{(i-1)\tau_{bin}}^{i\tau_{bin}}p(t)\mathrm{d}t \tag{9}$$

式中：N_L 为激光脉冲回波信号总光子数。则在整个探测过程中，i 时间区间内的回波光电子数为：

$$R(i)=\begin{cases}\eta N\tau_{bin}(i\leqslant j)\\ \eta N\tau_{bin}+\int_{(i-j-1)\tau_{bin}}^{(i-j)\tau_{bin}}\eta N_L p(t)\mathrm{d}t(i>j)\end{cases} \tag{10}$$

式中：N 为总的平均激励噪声频率；j 为目标位置所对应的时间区间索引，η 为探测器的量子效率。

仿真过程中，对单个激光脉冲，笔者按照时间轴顺序依次对每个时间区间进行原电子产生判断：利用该时间区间内的回波光电子数 $R(i)$ 为参量的泊松分布发生器，产生随机数，若产生的随机数大于 0，认为在该时间区间内产生原电子。然后根据探测器的时间抖动特性，利用泊松分布随机产生探测器输出信号的时间偏移值，由原电子产生的时间区间索引和时间偏移值，得到光子飞行时间，从而确定目标位置。从第一个时间区间依次进行仿真，直到产生原电子为止。重复单脉冲测量过程，将每个单脉冲测量产生的目标距离信息，进行统计累加，得到目标距离统计直方图，即回波信号统计波形。对回波信号统计波形使用不同的方法(如峰值法，互相关算法)，可以推出此次测量得到的目标距离。

2.2 仿真结果

结合实验系统，仿真中系统参数设定为：激光频率为 2.5 MHz，积分时间为 0.1 s，总噪声为 $N=2\times10^4$ Hz，时间区间间隔 $\tau_{bin}=4$ ps。仿真参数设定如下：激光脉冲宽度设定为 100 ps、200 ps、300 ps 和 400 ps；探测器时间抖动设定为 250 ps、500 ps、750 ps 和 1 000 ps；根据主动激光雷达探测原理，原电子产生数量满足泊松分布的前提是回波光子数很小，所以仿真中回波信号强度(用激光回波信号光子总数表征)设定为 0~10。

2.2.1 回波信号波形

仿真得到的典型参数下(激光脉宽为 100 ps，探测器时间抖动为 250 ps，回波信号光子数为 4)回波信号统计波形如图 2 所示。

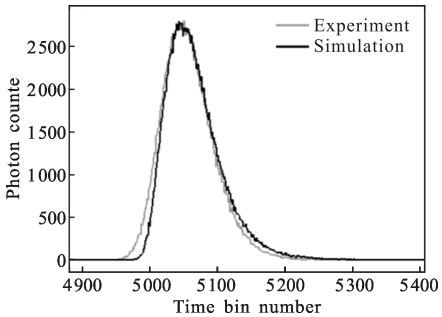

图 2 探测回波波形仿真

Fig.2 Simulation of detection echo waveform

由图 2，仿真与实验所得的回波信号统计波形接近，有着相同的波形特征。由此可以看出，仿真算法可以很好地描述实际的单光子测距系统探测过程。但是，仿真与实验波形也存在着一定的差异，在峰值中心位置重合的情况下，实验波形的起始位置和截止位置都更靠前。实际探测过程中，很多外在因素(如大气折射、目标形状、内部散射等)都会产生噪声，使得回波统计波形更为平缓，而这些是笔者在仿真中近似忽略的内容。

改变激光脉宽以及探测器时间抖动的大小，得到相应的回波波形，如图 3、4 所示。

由图 3，随着激光脉宽的增加，回波统计波形的脉宽增加，峰值中心的位置向后偏移，但波形起始位置的后移幅度小于波形下降位置的后移幅度。在一

定回波强度下，对于一个回波信号，位于光子序列后端的时间区间因为受到前面时间区间的影响，原电子产生概率更低。

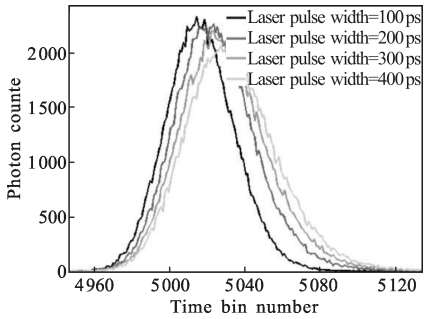

图 3 不同激光脉宽的回波统计波形(时间抖动为 250 ps，回波信号光子数为 4)

Fig.3 Echo waveform under different Laser pulse width(time jitter is 250 ps, echo signal photon number is 4)

由图 4，随着探测器时间抖动的增加，回波统计波形的脉宽也随之增加，但中心点的位置几乎不发生偏移。回波波形的脉宽在中心随着探测器时间抖动的增加向两边展宽。探测器的时间抖动不影响原电子是否产生，即不影响回波统计波形的峰值中心位置。

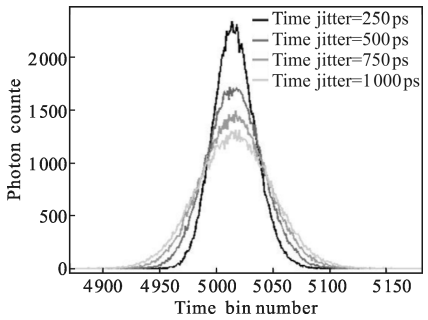

图 4 不同时间抖动的回波统计波形(激光脉宽为 100 ps，回波信号光子数为 4)

Fig.4 Echo waveform under different time jitter(laser pulse width is 100 ps, echo signal photon number is 4)

2.2.2 测量精确度和准确度

在上述仿真的基础上，对同一参数的探测过程进行重复多次(100 次)仿真，对探测精度(精确度和准确度)进行分析。取回波信号统计波形峰值对应的时间点为目标位置。定义多次仿真目标距离值的标准差，为距离重复率，即测量精确度。目标位置与仿真设定实际目标位置的差值的平均值为测量准确度。在不同激光脉宽和探测器时间抖动条件下，改变回波信号强度，得到相应参数下的测量精确度和准确度。如图 5、6 所示，其中离散点为仿真值，曲线为拟合曲线。

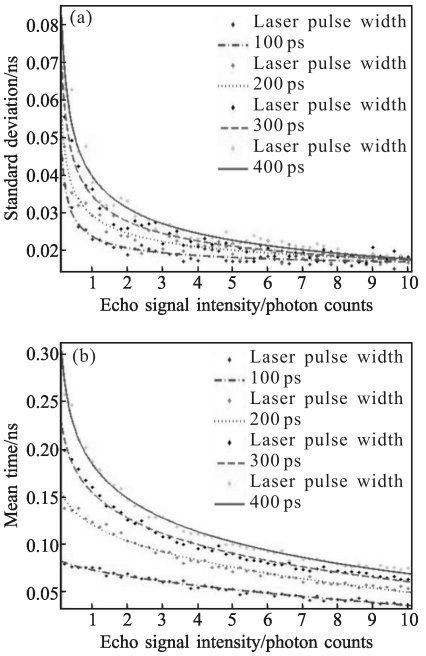

图 5 不同激光脉宽对应的测量精确度和准确度随回波信号强度变化曲线

Fig.5 Measurement precision and accuracy curves with changing of echo signal intensity under different laser pulse width

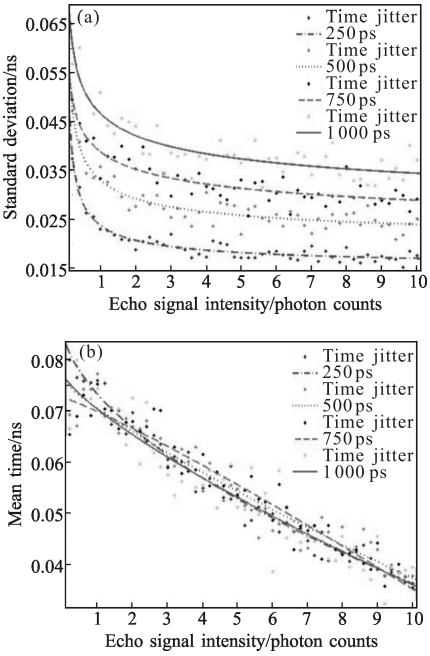

图 6 不同时间抖动对应的测量精确度和准确度随回波信号强度变化曲线

Fig.6 Measurement precision and accuracy curves with changing of echo signal intensity under different time jitters

由图 5(a)可知,在任意脉冲宽度条件下,增加回波信号强度可以提高测量精确度。特别地,当回波信号强度较弱(小于 4)的情况下,测量精确度随回波信号强度增加,迅速提高;但当回波信号强度达到临界值时,增加回波信号强度对提高测量精确度的贡献并不明显。该临界值与 SPAD 的光子探测效率有关,即当回波信号强度大于此临界值时,SPAD 在激光反射持续阶段前端被激发的概率将趋近于 1。由图 5(b)可知,激光脉宽越窄,测量准确度随回波信号强度变化的幅度就越小。

时间抖动特性是探测器的固有特性,与探测器的探测模型无关,不影响每个时间区间的原电子产生概率。由图 6(a)可知,在任意时间抖动条件下,增加回波信号强度,可以提高测量精确度,特别地,在回波信号强度较弱(小于 3)的情况下,测量精确度随回波信号强度的增加,迅速提高。此外,对比每两条曲线,其差值几乎不随回波信号强度的增加而变化,这意味着,探测器时间抖动对测量精确度的影响与所处的回波信号强度大小无关。由图 6(b)可知,增加回波信号强度,有助于提高测量准确度。但改变时间抖动对测量准确度的提高帮助不大。

由仿真数据可以得出,在激光脉宽为 100 ps、时间抖动为 250 ps 的典型参数条件下,精确度变化范围为 0.45~0.2 ns,对应的距离为 0.675~0.3 cm;准确度变化范围为 0.08~0.04 ns,对应的距离为 1.2~0.6 cm。

3 实验结果及分析

3.1 系统结构

系统结构图 7 所示,激光经过两个反射镜,与镜头同轴出射,到达目标后漫反射形成回波信号。激光光源的同步信号触发 TCSPC,产生同步起始信号。回波信号经过镜头接收,窄带滤波片滤除背景光噪声

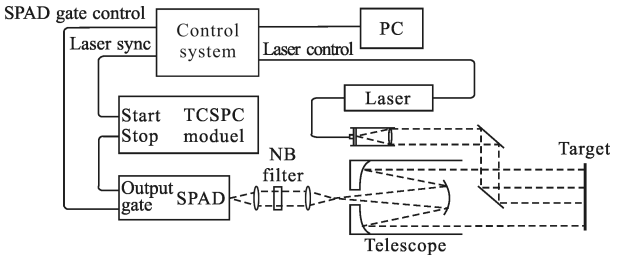

图 7 系统结构图

Fig.7 System structure

后,最终被探测器接收,激励 SPAD 从而产生目标位置的时间标志,即距离值。

实验系统中,脉冲激光光源使用的是被动调 Q 半导体激光器,波长为 830 nm,频率为 2.5 Hz,半波宽为 100 ps。接收镜头为卡塞格林望远系统,接收口径为 8 cm。光子探测器使用的是硅单光子雪崩二极管(SPAD),存在着 250 ps 的探测时间抖动。时间相关单光子计数模块,使用的是 PicoHarp 300 TCSPC 模块,时间分辨率为 4 ps。实验在暗室进行,总噪声(背景噪声和暗电流)测得为 2.5×10^4 Hz。

3.2 实验结果

实验系统搭建完成后,在实验室内进行实验,为了得到系统的测距精度,进行以下两项实验:(1) 选择距离 10 m 左右的目标,将目标精确向后依次移动 1 cm,积分时间为 0.1 s;(2) 对同一距离的目标进行 100 次重复实验。前者可以测试系统的精确度,后者测试系统的准确度。实验结果如图 8 所示。

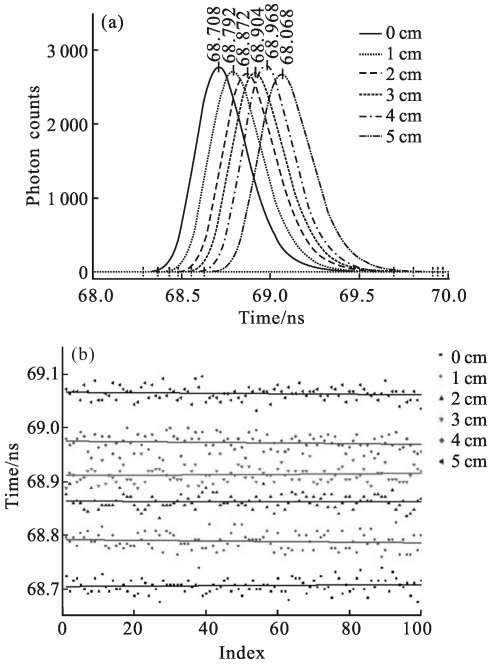

图 8 实验结果

Fig.8 Experiment results

由图 8(a),标准距离差为 1 cm,但实际距离值分别为 1.26 cm、1.2 cm、0.48 cm、0.96 cm、1,92 cm。另一方面,由图 8(b)可以得出,对同一距离值,多次重复实验的距离值也存在着一定的差异性,在 0~5 cm,每个距离值的精确度分别为 0.395 cm、0.455 cm、0.386 cm、0.424 cm、0.445 cm。

实验结果表明:实验系统对 10 m 处目标的测量精确度在 4 mm 左右,与相同参数下的仿真结果相吻合,验证了仿真算法的有效性。由理论分析,造成这些误差的原因,主要是由于激光存在一定的脉宽以及探测系统存在一定的时间抖动,使得回波信号波形存在一定的脉宽,脉宽的大小直接影响单光子测距系统的测量精确度和准确度。

4 结 论

给出了基于 TCSPC 技术的单光子激光测距系统理论模型,并且通过蒙特卡洛法对整个探测过程进行了有效仿真,得到了激光脉冲强度、激光脉宽和探测器时间抖动对测量准确度、精确度的具体影响。同时构建了实验室实验系统,通过大量实验得到了测距系统的测量精度,验证了相同参数下的仿真结果。总的来说,回波信号强度越大,激光脉宽越窄,探测器时间抖动越小,会得到更高的测量精度;而在不同的回波信号强度条件下,激光脉宽和探测器时间抖动对测量精度的影响存在着差异。根据文中的分析及仿真结果可以对系统参数的合理选择提供一定的参考,从而达到实际单光子测距系统的精度要求。

系统仿真中,参数的选取有限,另外,实际测距系统的影响因素甚多,下一步笔者可以对大气环境、目标材质、形状特征以及背景信噪比等外部环境因素进行研究分析,同时改变实验系统光源、背景噪声等参数,进一步研究分析单光子测距系统的精度。

参考文献:

[1] Albota M A, He inrichs R M, Kocher D G. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. ***Appl Opt***, 2002, 41: 7671-7678.

[2] Massa J S, Wallace A M, Buller G S. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting [J]. ***Opt Lett***, 1997, 22: 543-545.

[3] Fouche Daniel G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors [J]. ***Appl Opt***, 2003, 42: 5388-5398.

[4] Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu. Range accuracy limitation of pulse ranging systems based on Geiger mode single-photon detectors[J]. ***Appl Opt***, 2010, 49: 5561-5566.

[5] Hong Jin Kong, Tae Hoon Kim, Sung Eun Jo. Smart three-dimensional imaging ladar using two Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. ***Opt Express***, 2011, 19: 19323-19329.

[6] Philip Gatt, Steven Johnson, Terry Nichols. Geiger -mode avalanche photodiode ladar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. ***Appl Opt***, 2009, 48: 3261-3276.

[7] Albota M A, Aull B F, Fouche D G. Three -dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. ***Lincoln Lab J***, 2002, 13: 351-370.

[8] Steven Johnson, Philip Gatt, Terry Nichols. Analysis of Geiger-mode APD laser radars [C]//SPIE, 2003, 5086: 359-368.

[9] Markus Henriksson. Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system[J]. ***Appl Opt***, 2005, 44: 5140-5147.