

doi: 10.3788/gzxb20154401.0125003

大气背景下盖革模式 APD 激光雷达探测性能计算

苏必达^{1,2}, 王景峰², 马雪松¹, 张海洋¹, 华昊², 杨苏辉¹

(1 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

(2 光学辐射重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 盖革模式工作的雪崩光电二极管, 以其灵敏度高著称, 广泛应用于天文观测、粒子物理学、激光雷达以及通信领域。但是由于雪崩光电二极管易受到噪音的影响, 特别是在背景光较亮的白天, 背景噪音对探测有很大影响。本文针对白天大气背景噪音的情况, 建立了盖革模式雪崩光电二极管的探测统计模型, 通过设定不同探测器阈值和噪音值进行仿真计算, 分析了探测阈值与噪音对虚警率的影响, 给出了提高最远探测距离的途径与方法。通过限制滤光片带宽、减小探测器开启时间等方法可以将背景噪音光子数减小到 2, 在 900 km 处的探测成功率为 96.6%。对雷达散射截面为 1 m² 的非合作目标, 探测成功率为 70%。

关键词: 光电子; 激光雷达; 概率统计; 探测器; 盖革模式 APD; 探测能力; 非合作目标

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0125003-4

Detection Performance for Laser Radars that Use Geiger-mode APD in Atmosphere Background

SU Bi-da^{1,2}, WANG Jing-feng¹, MA Xue-song¹, ZHANG Hai-yang¹, HUA Hao², YANG Su-hui¹

(1 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: The Geiger-mode APD is very sensitive. For this advantages, it is widely used for astro-observation, particle physics, LIDAR. Sky background noise is a big problem for Geiger-mode APD detector during the day. The detection statistical model in theory was built, False alarm probability and detection probability and finding the way to increase maximum detection distance in difference detection threshold and background noise were discussed. In difference background noise, the maximum detection distance was determined. By limiting the filter bandwidth or reducing the detector open time, the background noise photon number is reduced to 2. The success rate of detection at 900Km is 96.6%. To the non-cooperative target, when the radar scattering cross section is 1 m², the success rate of detection is 70%.

Key words: Optoelectronics; Ladar; Probability statistics; Detectors; Geiger-mode APD; Detectivity; Non-cooperative target

OCIS Codes: 250.0040; 250.1345; 250.1345; 260.5150

0 引言

当雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 所加的偏置电压低于一定值时, 输出电流和接收的光电流线性相关的, 即探测器处于线性工作状态。当超过这一特定电压时, 载流子被大量的从器件中激发出来,

输出电流迅速达到饱和值, 即 APD 工作在盖革模式。

在激光雷达直接探测中, APD 的盖革模式使得探测器相当敏感, 理论上单个光子就可以引起电脉冲, 并且脉冲具有高峰值窄脉宽的特点, 具有很高的时间分辨本领 (可达皮秒级), 可以更精确地测量目标距离。同时, 这一脉冲可以触发数字时序电路, 避免使用模拟电路。

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61271110) 和重点实验室基金 (No. 0941C2012) 资助

第一作者: 苏必达 (1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光散射特性及激光探测技术。Email: sbds_cn@163.com

导师 (通讯作者): 杨苏辉 (1968-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为固体及光纤激光器、激光雷达。Email: suhuiyang@bit.edu.cn

收稿日期: 2014-04-21; **录用日期:** 2014-08-08

<http://www.photon.ac.cn>

近年来,激光雷达在盖革模式 APD 的运用已经得到了长足的发展^[1-3],在实际中也得到了广泛的应用^[4].

但是盖革模式在探测器的两个电脉冲之间需要进行一定时间(一般为 10~100ns)的复位,如果在接收目标反射回的信号光到达 APD 前,背景光或者暗电流引起了电脉冲使得 APD 进入复位状态,则信号光有可能在 APD 复位状态时到达探测器,导致探测器无法响应信号光,容易受噪音的影响,造成高虚警率,影响探测质量.本文从理论上分析 APD 探测过程,建立大气模式下 APD 的探测统计模型,从不同探测阈值分析了背景噪音对虚警率的影响.

1 盖革模式 APD 的探测统计模型

1.1 探测器接收光子数 k 的概率密度函数

当一个激光束照射一个漫反射目标时,从目标反射回的光子数不再是一个确定的量,而是一个随机过程.由于光电过程是一种均匀的泊松过程^[5-8],所以对于光子计数 k 有

$$p_s(k) = \frac{N_s^k}{k!} \exp(-N_s) \quad (1)$$

式中

$$N_s = E_{rec}/h\nu \quad (2)$$

当探测器工作时,环境中的背景光以及探测器自身的暗电流,都可以激发探测器从而产生计数,对于噪音的统计描述也采用泊松分布.故每个采样时间内探测器激发的总次数为信号计数与噪音计数之和的随机变量.设 N_n 为噪音的平均值,计数随机变量 $N = N_n + N_s$.对于随机变量 N ,光子计数 k 的概率密度函数为

$$P_{s+N}(k) = \frac{(N_s + N_n)^k}{k!} \exp(-(N_s + N_n)) \quad (3)$$

分别取 N 为 15、30、45,得到不同的 N 下,光子计数 k 的概率密度函数曲线,如图 1.

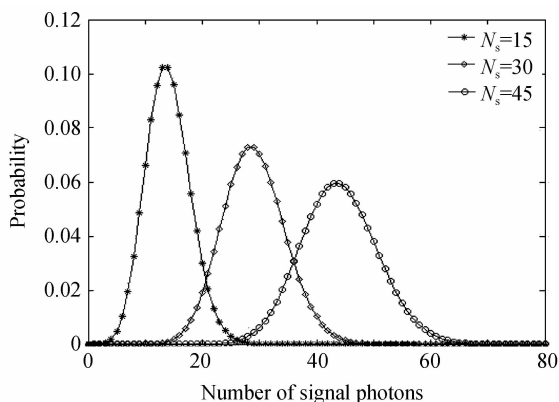


图 1 光子计数 k 的概率密度函数

Fig.1 The probability density function of photon count k

从图 1 可看出,随着信号光子数的增大,密度函数的均值也越来越大,说明探测器产生了更多的光子计数.

1.2 探测器的虚警概率

在激光雷达的设计工作中,虚警率直接影响了激

光雷达的探测性能,所以在激光雷达的设计工作中对虚警率有着严格的要求,激光主动探测系统的虚警概率实际上就是系统噪音大于探测器阈值的概率^[9].式(1)已经给出了噪音光子计数的概率密度函数,所以探测器的虚警率为

$$PFA = \sum_{k=N_{th}}^{\infty} \frac{N_n^k}{k!} \exp(-N_n) = \exp(-N_n) \sum_{k=N_{th}}^{\infty} \frac{N_n^k}{k!} \quad (4)$$

由于 e^x 的泰勒级数展开为 $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$,所以式(4)变为

$$PFA = \exp(-N_n) \left[\exp(N_n) - \sum_{k=0}^{N_{th}-1} \frac{N_n^k}{k!} \right] = 1 - \exp(-N_n) \sum_{k=0}^{N_{th}-1} \frac{N_n^k}{k!} \quad (5)$$

式中 N_{th} 为探测器的探测阈值.

分别取 $N_{th} = 10, 20, 30, 40$,得到在这四种情况下平均噪音光子数与虚警概率的曲线(图 2).

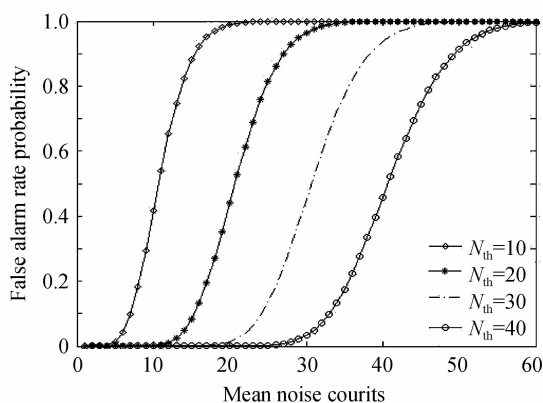


图 2 虚警概率曲线

Fig.2 The curve of false alarm rate

从图 2 中可以发现:1)随着平均噪音光子数的增长,虚警率也会增长,并且增长速度不均匀,每一个阈值下都存在一个梯度较大的区间,意味着在实际应用中将平均噪音光子数控制在这一区间之下,才能保证足够低的虚警率;2)随着探测阈值的提高,虚警率得到了抑制,并且阈值越大,抑制作用越明显,这为抑制激光雷达的虚警率指出了方向.

2 在大气背景下的探测率与虚警率

2.1 大气背景下探测器虚警率

激光雷达对非合作目标的白天应用中,不可避免地会引入环境背景噪音,在盖革模式 APD 的虚警率与探测成功率模型基础上讨论大气背景下盖革模式 APD 的探测性能.

光学系统接收到的背景光噪音产生的光电子数速率可表示为^[10]

$$\Lambda = \frac{\eta_n P_B}{h\nu} = \frac{\eta_n}{h\nu} N_\lambda (\delta\lambda) \Omega A_r \eta \quad (6)$$

式中: η_n 是探测器的量子效率; P_B 是经过接收系统进入到探测器的背景噪音功率; N_λ 是单位面积背景光辐

射; $\delta\lambda$ 是滤光片带宽; Ω_r 是接收视场角; A_r 是接收望远镜有效面积; η_r 是接收望远镜光学系统的接收效率.

对于盖革模式 APD 而言,大气背景下接收到的光子数为^[11-12]

$$N_b = \Lambda \tau_G \quad (7)$$

式中 τ_G 为探测器开启时间.假设探测器的量子效率为 0.2; $N_\lambda/h\nu = 2.14 \times 10^{19}$; $\delta\lambda = 3 \times 10^{-8}$; $\Omega_r = 420 \text{arcseconds}$; $A_r = 0.25 \text{ m}^2$; $\eta_r = 0.5$. 则 $\Lambda = 3.2 \times 10^7/\text{sec}$,假设探测器开启时间为 500 ns,那么 $N_b = 16$.

考虑总的噪音 $N = N_b = N_d$,其中 N_d 为探测器自身的噪音,与 N_b 相比,此处的 N_d 可以忽略,于是有 $N = N_b = 16$.

当背景噪音等于 16 时,不同探测阈值的虚警率如表 1.可知,当探测阈值达到 30 时,虚警率才下降到 0.1% 以下,所以探测阈值大于 30 能将虚警率控制在 0.1% 以下.

表 1 背景噪音光子数为 16 时不同探测阈值下的虚警率

Table 1 False alarm rate with different detection threshold when background noise is 16

Detection thresholds	The probability of false alarm PFA
N_{th}	
10	92.3%
15	53.3%
20	13.2%
25	1.31%
30	0.06%
35	0.01%
40	About 0

2.2 大气背景下非合作目标的探测成功率

设激光器发射能量为 1 J,对一个目标散射截面^[13-14]为 1 m^2 的非合作目标进行探测,要求探测率达到 90% 以上.如图 3 所示,更高的探测阈值并不能带来更良好的探测率,所以在保证低虚警的情况下,选择探测阈值为 35,如果要求探测率大于 90%,则需要 SNR

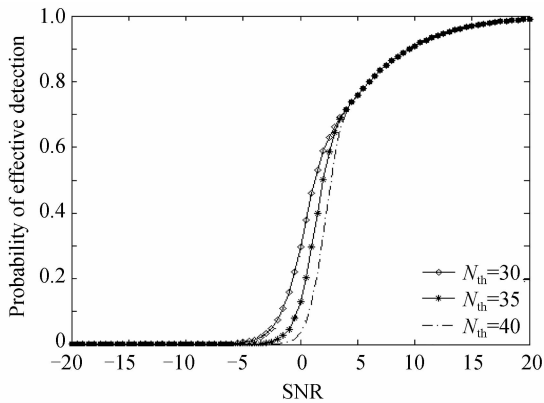


图 3 在噪音光子数为 16 时,不同探测阈值下探测成功率曲线

Fig. 3 The curve of probability of effective detection with different detection threshold when background noise is 16

大于 10,即信号光子数 $N_s = 160$.

接收系统与探测器参量不变,根据激光雷达方程^[15],能探测的最大距离是 696.6 km.考虑通过某些途径减小背景噪音^[16-18],如降低滤光片带宽、减小探测器开启时间等,可以进一步地降低系统接收到的背景噪音光子数,在这种情况下,可以得到不同噪音下探测成功率与距离的关系曲线,如图 4.

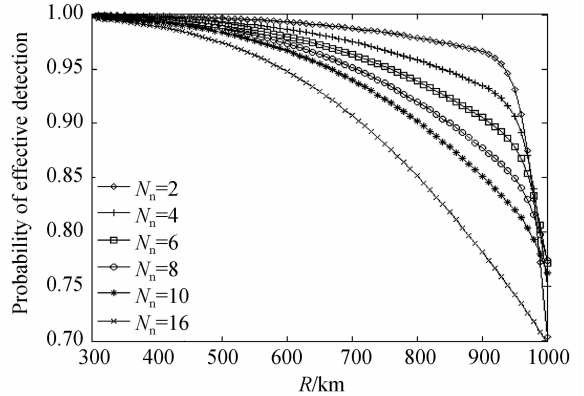


图 4 不同背景噪音下探测距离与探测成功率关系曲线
Fig. 4 The curve of probability of effective detection vs. distance with different background noise

从图 4 中再次证明通过减小背景噪音,可以显著地提高探测成功率,通过进一步限制滤光片带宽、减小探测器开启时间等将背景噪音光子数减小到 2 时,在 900 km 处的探测成功率仍为 96.6%.探测成功率为 90% 以上的最大距离为 960 km.

3 结论

本文针对白天大背景噪音建立了盖革模式雪崩光电二极管的探测统计模型.通过设定不同探测器阈值和噪音值进行仿真计算,分析了探测阈值与噪音对虚警率的影响,给出了提高最远探测距离的途径与方法.研究表明盖革模式 APD 对远距离非合作小目标具有良好的探测能力,为盖革模式 APD 的超远距离探测提供了理论依据.进一步优化系统参量,可以在对白天非合作目标的千公里级探测中取得较好的虚警率和探测成功率.

参考文献

[1] WANG Jian-yu, HONG Guang-lie, BU Hong-yi, et al. Study on airborne scanning lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2584-2589.
王建宇,洪光烈,卜弘毅,等.机载扫描激光雷达的研制[J].*光学学报*, 2009, **29**(9):2584-2589.

[2] ZHANG Hai-yang, ZHAO Chang-ming, YANG Su-hui. The methods of decreasing the phase noise influence in micro-doppler lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 753-757.
张海洋,赵长明,杨苏辉.激光微多普勒探测系统中降低相位噪音影响的方法研究[J].*光子学报*, 2011, **40**(5):753-757.

[3] WU Li-juan, LI Li, REN Xi-ming. 3D imaging simulation of APD arrays laser radar system based on Geiger mode[J].

- Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(11): 2180-2186.
吴丽娟,李丽,任熙明. 盖革模式 APD 阵列激光雷达的三维成像仿真[J]. 红外与激光工程,2011,**40**(11):2180-2186.
- [4] DONG Yun-sheng, LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, *et al.* Application study of lidar in urban traffic pollution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 315-320.
董云升,刘文清,刘建国等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. 光学学报, 2010,**30**(2):315-320.
- [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 Journal of Lasers*, 2012, **39**(4): 0414003-0415000.
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):0414003-0415000.
- [6] DANIEL G, FOCHE. Detection and false-alarm probabilities for laserradars that use Geiger-mode detectors[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(27): 5388-5398.
- [7] DOUGLAS G, YOUMANS. Avalanche photodiode detection statistics fordirect detection laser radar[J] *Optics Express*, 1992, **1633**(Laser Radar VII): 41-53.
- [8] GOODMAN J W. Statistical optics[M]. New York: Wiley, 1985, 468-471.
- [9] LIU Xiao-bo, LI Li. Performance analysis of laser radar system using Geiger-Mode APD array[J]. *Aero Weaponry*, 2009,**6**: 35-38.
刘晓波,李丽. 基于盖革模式 APD 阵列的激光雷达性能分析[J]. 航空兵器,2009,**6**:35-38.
- [10] ZHANG Zi-ang. Research on detecting system of kHz SLR in daytime[D]. Wuhan: Changchun University of Science and Technology, 2011,15-16.
张子昂. 白天 kHz 卫星激光测距回波探测系统研究[D]. 长春:长春理工大学, 2011 年,15-16.
- [11] YANG Fu-min, XIAO Chi-kun, CHEN Wan-zhen, *et al.* The design and test results about system of SLR in daytime[J]. *Science China Mathematics*, 1998, **28**(11): 1048-1056.
杨福民,肖焱焜,陈婉珍,等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果[J]. 中国科学(A 辑),1998,**28**(11):1048-1056.
- [12] LIANG Chuang, LIAO Jing, LIANG Bing, *et al.* Performance of a silicon avalanche diode as a single photo detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1142-1147.
梁创 廖静,梁冰等硅雪崩光电二极管单光子探测器[J]. 光子学报,2000,**29**(12):1142-1147.
- [13] 戴永江. 激光雷达技术(上册)[M]. 北京:电子工业出版社, 2010. 179-180.
- [14] WANG Qi-ming,JIANG Yan-bin, *et al.* APD circuit system for weak signal detection under strong interference[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1753-1755.
王启明,姜燕冰,张秀达,等. 采集强干扰下微弱信号的 APD 电路系统研究[J]. 光子学报,2008, **37**(9): 1753-1755.
- [15] LIAN Yue, LIU Wen-qing, ZHANG Tian-shu, *et al.* Measurement analysis of atmospheric aerosol aerodynamics size with APD detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1837-1840.
连悦,刘文清,张天舒,等. 利用 APD 对大气气溶胶空气动力学直径测量分析[J]. 光子学报,2005, **34**(12): 1837-1840.
- [16] WEI Zheng-jun, LIAO Chang-jun, WANG Jin-dong, *et al.* Single photon detection at 1550 nm wavelength at temperature of above 253 K[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 906-909.
魏正军,廖俊俊,王金东,等. 在高于 253 K 温度下的 1550 nm 波长单光子探测实验[J]. 光子学报,2006, **35**(6): 906-909.
- [17] YANG Ting-wu, ZENG Xiao-dong, WANG Hao Measurement and analysis of aircraft LRCS in outfield test[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 224-227.
杨廷梧,曾晓东,王浩,等. 飞机激光雷达散射截面测量与分析[J]. 光子学报,2013, **42**(2): 224-227.
- [18] XIN Xin, ZHANG Xiao-na, ZHOU Na. The laser radar cross section measurement technology research[J]. *Digital Technology and Application*, 2013, **4**: 102-103.
辛欣,张晓娜,周娜. 飞机激光雷达散射截面测量技术研究[J]. 数字技术与应用,2013,**4**:102-103.