

文章编号: 0258-7025(2002)06-0541-04

# 利用硅雪崩二极管检测激光脉冲信号

郭冠军<sup>1,2</sup>, 李树楷<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; <sup>2</sup> 安徽蚌埠坦克学院, 安徽蚌埠 233013)

**提要** 研究了用雪崩二极管(SiAPD)检测激光脉冲回波信号的统计特性,分析了激光测距系统的探测概率、虚警概率和漏探测概率与系统参数及检测电路所设阈值的关系。阈值的选取对系统的探测性能有很大影响,对实际系统的计算表明,回波产生的初级光电子数和 SiAPD 的平均增益决定了阈值的选取区间。

**关键词** 硅雪崩二极管, 探测概率, 虚警概率

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Detection of Pulse Laser Signal with Avalanche Diode Detectors

GUO Guan-jun<sup>1,2</sup>, LI Shu-kai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Remote Sensing Applications, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*  
<sup>2</sup>*Bengbu Tank College, Bengbu 233013*

**Abstract** Statistical properties of pulse laser signal detection using SiAPD as a detector has been theoretically studied, and the relation between the preset threshold and detection performance has been analyzed. Theoretical studies indicate that the threshold applied to the discriminator has the decisive influence on the detection performance. Analysis shows that primary photoelectrons and average gain of SiAPD determine the threshold scope within which it can guarantee the laser ranging systems detection probability and false alarm probability.

**Key words** SiAPD, detection probability, false alarm probability

## 1 引 言

机载、星载激光测距系统具有高精度地测量地表、月球及其他行星表面的能力。采用脉宽 1~10 ns 的激光脉冲和纳秒时间分辨率的电路,在几百公里的卫星轨道上,就可实现米、甚至厘米量级的测距精度<sup>[1]</sup>。星载的激光测距系统可测量一些重要的地理现象,如地极运动、地球板块漂移等,并能够对其他行星实施测绘,如月球、火星等<sup>[2~5]</sup>。近 20 年来,机载激光测距技术得到了迅速发展,主要用来测量火山、冰川和海洋表面<sup>[6~8]</sup>。脉冲式激光测距仪通常采用半导体抽运的激光器作信号源、低噪声的硅雪崩二极管(SiAPD)作探测器。Nd:YAG 半导体激光器具有非常高的峰值功率、极短的脉冲宽度和

较高的重复频率,已成为脉冲式激光测量首选的激光器<sup>[9~11]</sup>。雪崩二极管(APD)具有体积小、速度快和可靠性高的优点,它是目前可见光和近红外区的主要探测器之一。SiAPD 在可见光区的量子效率接近 100%,在近红外区也有较高的量子效率,在 1.06  $\mu\text{m}$  处,量子效率为 40%,并具有较大的带宽(100 MHz)<sup>[12,13]</sup>。SiAPD 与低噪声的 GaAs 场效应前置放大器相结合组成探测器,其探测灵敏度可达到  $3 \times 10^{-10}$  W,非常适合短脉冲的激光测量。高信噪比的脉冲式激光测距,无需采用多次测量平均的方法,每个脉冲都可获取距离信息。由于存在背景噪声、电路噪声和 APD 的散粒噪声,会造成脉冲式激光测距系统误探测或漏探测目标。探测概率、虚警概率和漏探测概率与检测电路所设阈值有关。本文重点

收稿日期 2001-03-14;收到修改稿日期 2001-06-11

基金项目 国家 863 计划 308 主题项目(项目号 863-308-12-01(1))

作者简介 郭冠军(1963—)男,山东人,蚌埠坦克学院副教授,博士,主要从事激光雷达与微波遥感方面的研究。E-mail:

guanjun-guo@hotmail.com

研究脉冲信号检测的统计特性,分析探测概率、虚警概率和漏探测概率与所选阈值的关系,并针对实际的系统分析了阈值的选取方法。

## 2 脉冲信号检测的统计特性分析

图 1 给出了脉冲式激光测距的原理图,采用半导体抽运的 Nd:YAG 激光器,发射高重复频率的脉冲( $>1000$  Hz),大口径的望远系统收集回波信号。由于激光的光谱宽度很窄,利用干涉滤光片能有效

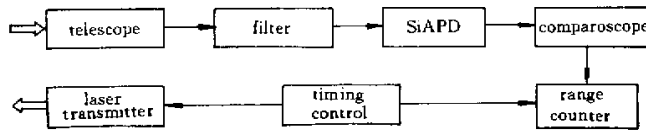


图 1 激光测距原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser ranging

地滤除背景噪声,滤波器的通带宽度约为  $1$  nm。在望远物镜的主焦点上,放置 SiAPD 探测器, SiAPD 输出的信号送到高速比较器,与预先设置的阈值进行比较。当回波信号强度超过所设阈值时,认为目标存在,反之认为目标不存在。时钟脉冲控制着激光脉冲的发射和计数器的计数。脉冲发射的同时,计数器开始计数,当回波强度超过检测电路所设阈值时,计数器停止工作,这样就记录下了激光脉冲往返所需要的时间。

设望远系统所接收的回波功率为  $W(t)$ , SiAPD 的光电转换量子效率为  $\eta$ ,在  $\{t, t + \tau\}$  的时间间隔内,所探测的平均初级光电子数  $\bar{n}$  为

$$\bar{n} = \frac{\eta}{h\nu} \int_t^{t+\tau} W(\xi) d\xi \quad (1)$$

式中,  $h\nu$  为光子能量。在平均初级光电子数一定的情况下,从 SiAPD 输出的光电子数  $x$  的条件概率为

$$P(x | \bar{n}) = \sum_{j=0}^{\infty} P(x | j) P(j | \bar{n}) \quad (2)$$

式中  $j$  为二级光电子的数目。背景噪声主要有:目标反射的太阳辐射和目标自身的热辐射、APD 的表面漏电流和体漏电流。由于采用干涉滤光片,其通带宽度约为  $1$  nm,非常有效地滤除了背景噪声,其背景噪声光电子数远小于  $1$ ,可忽略。目前,低噪声的 SiAPD 的表面漏电流约为  $10$  nA,体漏电流小于  $1$  pA。体漏电流虽经 APD 放大,由于体漏电流太小,产生的噪声光电子数可忽略。在二级光电子数给定的情况下,  $x$  服从高斯分布<sup>[14]</sup>

$$P(x | j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x}_j)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3a)$$

$$\bar{x}_j = j + I_s\tau/q \quad (3b)$$

$$\sigma^2 = I_s\tau/q + \frac{4KT}{R} \tau \quad (3c)$$

(3) 式中,  $q$  为电子的电量,  $I_s$  为 APD 的表面漏电流,  $K$  为波尔兹曼常数,  $T$  为负载的等效噪声温度。在初级光电子平均数给定的条件下, McIntyre<sup>[15]</sup> 和 Conrad<sup>[16]</sup> 给出了二级光电子数  $j$  的条件概率

地滤除背景噪声,滤波器的通带宽度约为  $1$  nm。在望远物镜的主焦点上,放置 SiAPD 探测器, SiAPD 输出的信号送到高速比较器,与预先设置的阈值进行比较。当回波信号强度超过所设阈值时,认为目标存在,反之认为目标不存在。时钟脉冲控制着激光脉冲的发射和计数器的计数。脉冲发射的同时,计数器开始计数,当回波强度超过检测电路所设阈值时,计数器停止工作,这样就记录下了激光脉冲往返所需要的时间。

$$P(j | \bar{n}) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n! \left(\frac{j}{1 - k_{\text{eff}}} + 1\right)}{j(j-n)! \left(\frac{k_{\text{eff}}j}{1 - k_{\text{eff}}} + 1 + n\right)} \times \left[\frac{1 + k_{\text{eff}}(G-1)}{G}\right]^{n+jk_{\text{eff}}} \times \left[\frac{(1 - k_{\text{eff}})(G-1)}{G}\right]^{j-n} \times \frac{(\bar{n})^n}{n!} e^{-\bar{n}} \quad (4)$$

式中,  $\Gamma(\dots)$  为伽马函数,  $k_{\text{eff}}$  为空穴电离系数与价带电子电离系数的比率,  $G$  为 APD 的平均增益。APD 的增益为一个随机变量,因此引入了过剩噪声系数  $F = j^2 / j^2$ , 在(4)式中,  $\dots$  代表对变量求平均。过剩噪声系数与 APD 参数的关系为

$$F = k_{\text{eff}}G + (1 - k_{\text{eff}})(2 - 1/G) \quad (5)$$

对于预先设定阈值的检测系统,由于 APD 增益的涨落,并存在着探测系统噪声,会造成误探测和漏探测目标,设检测系统的阈值(用光电子数表示)为  $x_T$ , 回波信号产生的平均初级光电子数为  $\bar{n}_s$ , 噪声产生的平均初级光电子数为  $\bar{m}_n$ , 检测系统的探测概率为

$$P_D = \sum_{x=x_T}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} P(x | j) P(j | \bar{n}_s + \bar{m}_n) \quad (6)$$

系统的虚警概率为

$$P_{\text{fa}} = \sum_{x=x_T}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} P(x | j) P(j | \bar{m}_n) \quad (7)$$

系统的漏探测概率为

$$P_{\text{mis}} = \sum_{j=0}^{x_T} \sum_{x=j}^{\infty} P(x | j) P(j | \bar{n}_s + \bar{m}_n) \quad (8)$$

阈值的选取决定了系统的检测性能,从(6)(7)和(8)式可看出,阈值  $x_T$  选取的越小,探测概率就越大,漏探测概率就越小,相应的虚警概率就越大;反之,阈值选取的越大,探测概率和虚警概率就越小,漏探测概率就越大。对于一个实际的系统,阈值应存在一个范围,在该范围内,系统有较高的探测概率和不超过允许范围的虚警概率。

### 3 对实际系统的计算和讨论

设飞行高度  $Z$  为 10 km,大气的单程透过率  $\tau_a$  按经验公式<sup>[17]</sup>估算,约为 0.5。并假设目标(地面)为理想的漫反射体(朗伯体),散射立体角  $\Omega = \pi$ 。由于地物可以为岩石、土壤、草地、针叶林和阔叶林等,其反射率  $r$  存在着较大差异。在 1.06  $\mu\text{m}$  处,岩石、

土壤的反射率在 10%~30% 的范围内,植被的反射率约在 40%~60% 的范围内。综合起来,地物的平均反射率值约为 30%,在计算中采用其平均值。光子的能量  $h\nu = 1.87 \times 10^{-19} \text{ J}$ ,  $A_r$  为物镜的有效面积,约为  $9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。回波信号产生的初级光电子数  $\bar{n}_s$  可由下式计算

$$\bar{n}_s = \left( \frac{\eta E_t}{h\nu} \right) \left( \frac{A_r}{Z^2} \right) \tau_0 \tau_a^2 \left( \frac{r}{\Omega} \right) \quad (9)$$

按表 1 中的参数计算,回波信号产生的平均初级光电子数  $\bar{n}_s = 1.15 \times 10^3$ 。噪声初级光电子主要是 APD 表面漏电流产生的,初级噪声光电子数为

$$\bar{m}_n = I_s \tau / q \quad (10)$$

按上式可求得噪声初级光电子数约为 650。

从图 2 可看出,随着阈值  $x_T$  的增加,探测概率

表 1 机载激光测距系统参数

Table 1 Parameters of airborne laser rangefinder

Laser wavelength	$\lambda = 1.064 \mu\text{m}$	SiAPD bulk leakage current	$I_b = 0.1 \text{ pA}$
Laser pulse width	$\tau = 10 \text{ ns}$	SiAPD surface leakage current	$I_s = 10 \text{ nA}$
Laser pulse energy	$E_t = 0.5 \text{ mJ}$	SiAPD ratio of ionization coefficient	$k_{\text{eff}} = 0.01$
Laser divergence angle	$\psi = 3 \text{ mrad}$	SiAPD quantum efficiency	$\eta = 40\%$
Aperture of objective	$D = 120 \text{ mm}$	SiAPD average gain	$G = 120$
Transmissivity of optical system	$\tau_0 = 0.5$	SiAPD excess noise coefficient	$F = 4.5$
APD load resistance	$R = 1000 \Omega$	SiAPD equivalent noise temperature	$T_e = 300 \text{ K}$

减小。在  $\lg x_T = 5.05$  即阈值  $x_T = 1.12 \times 10^5$  时,探测概率  $P_D = 99.9\%$ 。当  $\lg x_T > 5.1$  即阈值  $x_T > 1.26 \times 10^5$  时,探测概率  $P_D < 93\%$ 。当  $\lg x_T = 5.2$  时,即阈值  $x_T = 1.59 \times 10^5$  时,  $P_D = 0.5\%$ 。由图 2 可看出,当阈值  $x_T$  在  $1.26 \times 10^5$ 、 $1.59 \times 10^5$  区间内时,探测概率变化非常快。平均增益与初级光电子数的乘积  $G\bar{n}_s = 1.38 \times 10^5$ ,处于该范围的中间。对于一个给定的系统,根据探测概率的要求,总能找到

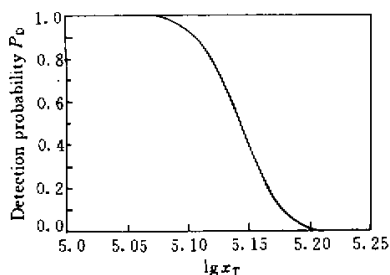


图 2 探测概率与阈值的关系曲线

Fig. 2 Detection probability versus the threshold

一个数  $M$ ,当阈值取  $x_T < (G - M)\bar{n}_s$ ,能够满足系统的要求。

从图 3 可以看出,阈值越小,虚警概率越大。当阈值接近平均初级光电子数  $\bar{n}_s$  时,  $x_T = 1000$ ,虚警概率  $P_{fa} = 48.8\%$ ,此时虚警概率非常大。随着  $x_T$  的增加,虚警概率逐渐减小。当  $\lg x_T > 4.3$  时,即阈值  $x_T > 2.1 \times 10^4$ ,虚警概率  $P_{fa} < 0.1\%$ ,此时  $x_T$  约为初级光电子数的 20 倍。随着阈值  $x_T$  的进一步增加,虚警概率  $P_{fa}$  衰减非常迅速。如果要使虚警概率  $P_{fa} < 10^{-6}$ ,阈值  $x_T$  应为初级光电子数的 40 倍以上。对于一个测距系统,在给定虚警概率指标的情况下,总存在一个自然数  $M$ ,在阈值  $x_T > M\bar{n}_s$  的情况下,虚警概率能够满足系统要求。

漏探测概率与探测概率之和为 1,从图 4 可看出,随阈值的增加,漏探测概率逐渐增大,在  $x_T = G\bar{n}_s = 1.38 \times 10^5$  附近时,变化非常迅速。对于实际的系统总存在一个数  $M$ ,当  $x_T < (G - M)\bar{n}_s$  时,满足系统漏探测概率的要求。

综上所述,阈值的选取应存在一个范围,在该区

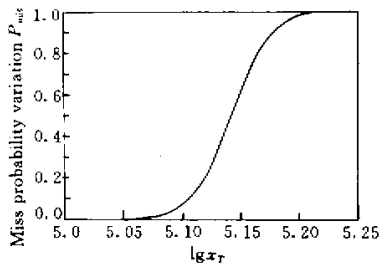


图4 漏探测概率与阈值的关系曲线

Fig. 4 Miss probability variation with the threshold

间内既可保证探测概率满足要求又可保证虚警概率不超过允许的范围,该范围的大小与初级光电子数和 APD 的平均增益有关,阈值的范围可按下属关系选取

$$M\bar{n}_s \leq x_T \leq (G - M)\bar{n}_s \quad (11)$$

$M$  的值应根据实际系统的探测概率、虚警概率和漏探测概率的指标进行选取,如果对于上述系统,要使探测概率  $P_D > 99.9\%$ ,漏探测概率  $P_{\text{mis}}$  和虚警概率  $P_{\text{fa}}$  小于  $0.1\%$ ,那么  $M$  可取 20,阈值  $x_T$  取此范围内的任何一个值,都可以满足系统的要求。如果要使探测概率  $P_D > 1 - 10^{-6}$ ,漏探测概率  $P_{\text{mis}}$  和虚警概率  $P_{\text{fa}}$  小于  $10^{-6}$ , $M$  只要取 40 就可满足要求。

## 4 结 语

通过对实际系统的计算表明,当阈值选在初级光电子数附近时,探测概率为 1,漏探测概率为 0,但虚警概率很大;当阈值选在初级光电子数与 APD 平均增益的乘积附近时,虚警概率为 0,漏探测概率很大,探测概率较小。阈值存在一个区间,该区间的下限与初级光电子数有关,上限与初级光电子数和 APD 的平均增益的乘积有关,即存在这样一个区间

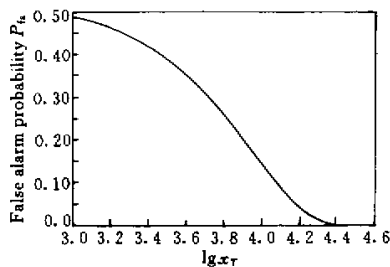


图3 虚警概率与阈值的关系曲线

Fig. 3 False alarm probability variation with the threshold

[  $M\bar{n}_s (G - M)\bar{n}_s$  ],当阈值处于该区间内时,可保证探测概率、虚警概率和漏探测概率满足系统要求, $M$  的大小可以根据系统的具体指标来确定。

## 参 考 文 献

- 1 J. J. Degnan. Satellite laser ranging: current status and future prospect [ J ]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **23**(4): 398~413
- 2 M. E. Shawe, A. G. Adelman. Precision laser tracking for global and polar motion [ J ]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **23**(4): 391~397
- 3 J. D. Mulholland. Scientific achievement from ten years of lunar laser ranging [ J ]. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1980, **18**(4): 549~564
- 4 W. M. Kaula, G. Schubert, R. E. Lingerfelter *et al.*. Apollo laser altimetry and inference as to lunar structure [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1974, **38**(12): 3049~3058
- 5 D. E. Smith, M. T. Zuber, H. V. Frey *et al.*. Topography of the northern hemisphere of mars from the mars orbiter laser altimeter [ J ]. *Science*, 1998, **279**(5357): 1686~1692
- 6 J. L. Bufton, J. B. Garvin, J. F. Cavanaugh *et al.*. Airborne lidar for profiling of surface topography [ J ]. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(1): 72~78
- 7 Seasat Special Issue II: Scientific Results [ J ]. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**(2): 238~425
- 8 M. A. Hofton, J. B. Blair, J. B. Minister *et al.*. An airborne scanning laser survey of long valley, California [ J ]. *Int. J. Remote Sensing*, 2000, **21**(12): 2413~2437
- 9 P. S. Cross, G. L. Harnagel, W. Streifer *et al.*. Ultra-high-power semiconductor diode laser arrays [ J ]. *Science*, 1987, **237**(4820): 1305~1309
- 10 K. Chan. Generation of high-power nanosecond pulses from laser diode-pumped Nd: YAG lasers [ J ]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(7): 1227~1230
- 11 K. Chan. Multiple-pass laser-diode-pumped Nd: YAG amplifier: design [ J ]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(6): 3177~3179
- 12 P. P. Webb, R. J. McIntyre. Recent developments in silicon avalanche photodiodes [ J ]. *RCA Engineer*, 1982, **27**(1): 96~102
- 13 P. P. Webb, R. J. McIntyre, J. Conradi. Properties of avalanche photo diodes [ J ]. *RCA Review*, 1974, **35**(2): 234~279
- 14 F. M. Dawson, X. L. Sun. Gaussian approximation versus nearly exact performance analysis analysis of optical communication systems with PPM signaling and APD receivers [ J ]. *IEEE. Trans. Comm.*, 1988, **36**(6): 1185~1191
- 15 R. J. McIntyre. The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: theory [ J ]. *IEEE. Trans. Electron Devices*, 1972, **19**(6): 703~713
- 16 J. Conradi. The distribution of gains in the uniformly multiplying avalanche photodiodes: experimental [ J ]. *IEEE. Trans. Electron Devices*, 1972, **19**(6): 713~718
- 17 W. L. Wolf, G. J. Zissis. *The Infrared Handbook* [ M ]. New York: Wiley & Son, 1978. Chapt. 23, p10