

文章编号: 1001-3806 (2008) 06-0628-03

激光测高仪中雪崩光电二极管的探测性能分析

姚萍萍, 赵 欣, 张 毅*, 赵平建, 涂碧海

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 光电探测器是影响激光测高仪探测性能的重要器件。为了使探测器性能保持最佳状态, 采用了近似算法进行分析。该算法使用近似分布函数来模拟探测器的输出, 推导出虚警率与阈值门限和倍增因子三者之间的函数关系, 找出虚警率、阈值和增益之间的最佳结合点。实验表明, 根据该方法设计的激光测高仪探测器接收电路, 可使探测概率和回波信噪比有显著提高。这一结果对激光测高仪目标特性的回波分析和地形地貌 3 维轮廓重建有很大帮助。

关键词: 光电子学; 激光测高仪; 近似算法; 雪崩光电二极管; 虚警率

中图分类号: TN312+.7 **文献标识码:** A

Detection characteristics of avalanche photodiode in laser altimeter

YAO Ping-ping, ZHAO Xin, ZHANG Yi, ZHAO Ping-jian, TU Bi-hai

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The photo detector is an important device, which affects the detection capability in laser altimeters. In order to maintain the detector's best performance, an approximation algorithm was developed in which the approximate distribution function was used to simulate the output of the detector, so that the relationship among false detect probability, threshold and detector's gain was obtained, and the best combination of the three parameters were found. The experiment results indicate that the detector's receiver circuit based on the approximation algorithm owns apparent improvement in detect probability and echo signal-to-noise. This result is benefit for analyzing the object characteristics of laser altimeter and rebuilding the three-dimension contour of terrain and physiognomy.

Key words: optoelectronics; laser altimeter; approximation algorithm; avalanche photo diode; false detect probability

引 言

激光测高仪是搭载在飞行器(航天飞机、卫星等)上利用激光测量地面到飞行器之间距离的光电装置。其工作原理是激光器以固定频率持续向地面发射激光脉冲, 脉冲光束穿越大气到达地面或者海面后产生微弱的后向散射回波被测高仪接收, 通过测量发射脉冲和回波脉冲的往返时间、回波波形和幅值等信息来获得地形地貌的 3 维轮廓图。

激光测高仪中回波检测的光学传感器使用的是低噪声、高灵敏度的硅雪崩光电二极管(avalanche photo diode, APD)。APD 在近红外区 1064nm 波长的量子效率高达 40%。由于星载激光测高仪的轨道高度在 500km 以上, 回波脉冲十分微弱, 在探测过程中又受到周围背景光辐射噪声、电子线路噪声和光电转换时 p-n

结的内部散弹噪声等影响, APD 可能检测不到回波脉冲或者错误地将噪声误认为回波脉冲, 从而降低测高精度, 影响回波信号的保真度。为提高测高仪的测高精度, 必须尽可能地降低接收系统的虚警率。虚警率主要受比较器阈值电平的设定和 APD 倍增因子取值的影响。当 APD 增益一定, 阈值越高, 系统虚警率越低, 但阈值电平不可能无限制地增加, 因为阈值电平过高, 会将回波信号也屏蔽掉。因此, 本文中主要研究在任何给定的接收信号和噪声等级下虚警率与检测门限、APD 倍增因子三者之间的关系。

目前在国际上采用多种方法对 APD 接收特性进行分析。传统的高斯算法使用高斯函数来模拟 APD 输出, 在高背景噪声情况下引起严重的误差。HEL-STROM^[1]提出了鞍点近似算法, 虚警率相对较高时, 其结果有所偏差。DAV DSON 和 SUN^[2-3]比较了采用高斯算法和近似分析算法分析脉冲位置信号调制的光通信系统性能。作者针对现有方法的优缺点, 在改进星载激光测高仪原理样机的背景下, 采用近似算法分析星载激光测高仪中 APD 的接收特性。

作者简介: 姚萍萍 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事星载激光测高仪电子学方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: yzhang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-11-15

1 近似算法理论分析

1.1 测高仪原理与 APD 输出分析

图 1 为星载激光测高仪的结构框图^[4-6]。激光发

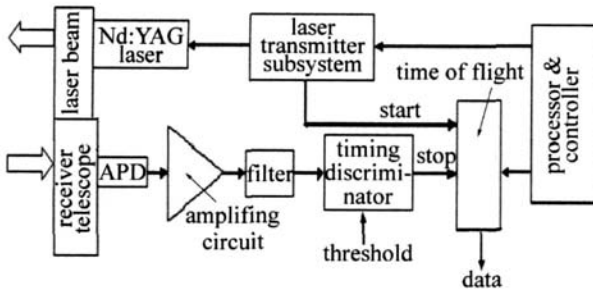


Fig 1 The block diagram of a typical laser altimeter system

射单元主要由半导体激光抽运 Nd:YAG 激光器组成。接收单元由接收望远镜、窄带滤光片和 APD 光电探测器组成。APD 输出的电信号先经过滤波以提高信噪比,再送入比较器与预先定好的阈值电平进行比较。距离测量电路在激光脉冲被发射时开始计数,在回波信号超过比较器的阈值时即产生停止信号后结束计数。为了降低虚警率^[7-8],在探测回波信号时采用了距离门的方法,即在估计回波信号到来之前打开测距模块,在测量完毕之后关闭测距模块。

由于回波脉冲十分微弱,基本上淹没在噪声中,因此,图 1 中的滤波器设计要将快速变化的回波信号从噪声中恢复出来,保持信号波形,同时提高回波信号的信噪比,故可选择取样积分器,其积分时间等于脉冲宽度。设 n 为积分间隔内 APD 所检测到的主要光子数目, x 为比较器输入信号,其数值等于信号总电荷量加上一个回波脉冲间隔内被积分的电路噪声, APD 输出分布函数 $p(x/n)$ 表示为:

$$p(x/n) = \sum_{m=0}^{\infty} p(x/m) p(m/n) \quad (1)$$

式中, m 为二次激发光子, $p(m/n)$ 为一个回波脉冲光照下 APD 激发的电子总数 m 的概率, M&LNTRE^[9] 和 CONRAD^[10] 推导出:

$$p(m/n) = \sum_{q=1}^m \frac{q! \left[\frac{m}{1 - k_{\text{eff}}} + 1 \right]}{m(m-q)! \Gamma \left[\frac{k_{\text{eff}} m}{1 - k_{\text{eff}}} + 1 + q \right]} \times \left[\frac{1 + k_{\text{eff}}(G-1)}{G} \right]^{q + [m \cdot k_{\text{eff}} / (1 - k_{\text{eff}})]} \times \left[\frac{(1 - k_{\text{eff}})(G-1)}{G} \right]^{m-q} \times \frac{(n)^q}{q!} \times e^{-n}, (m \geq 1) \quad (2)$$

式中, Γ 是伽马函数, G 是 APD 倍增因子, k_{eff} 是 APD 耗尽层内空穴与电子的电离概率。 $p(x/m)$ 为电路噪声的概率密度函数,电路噪声可看作高斯分布,其均值

和方差分别^[11]为:

$$x_m = qm + I_s \tau \quad (3)$$

$$\sigma^2 = qI_s \tau + \frac{2KT_e}{R} \tau \quad (4)$$

式中, I_s 为 APD 表面漏电流, τ 为回波脉宽, T_e 为负载电阻的等效噪声温度, R 为 APD 的负载电阻, K 为玻尔兹曼常数。APD 表面漏电流是 APD 暗电流的一部分,它不随 APD 的内部增益而倍增,表现为一常量直流。APD 暗电流的其余部分称为膨胀漏电流,它在 APD 内部进行倍增,表现为背景辐射噪声源。APD 比 PN 型光电探测器的优点在于它量子效率高、具有内部增益,可将信号倍增至百倍以上。若没有这个内部增益,光电流将基本上被淹没在电路噪声中。然而,由于这种增益的随机性,APD 在放大信号电流的同时也对噪声进行放大,即引入多余的噪声,如散粒噪声、暗电流噪声和雪崩增益引起的附加噪声。这种多余噪声因子被定义^[11]为:

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

从 (5) 式可以看出,附加噪声随 APD 增益增加而增加。因而对于 APD 倍增因子存在一个最优值使得 APD 信噪比达到最大。 k_{eff} 越小, APD 过剩噪声越小, G 也越大。对于商用硅 APD 管, k_{eff} 典型值为 0.01~0.02, 在军工器件中, k_{eff} 值最低可达到 0.004~0.006。

1.2 接收性能分析

如上面所描述的,在 APD 探测过程中存在两种检测错误,即虚警和漏警。设 n_s, n_0 分别为检测到信号光子和噪声光子的平均数目, $p[x/(n_s + n_0)]$ 是在接收光脉冲期间内被积分的 APD 输出的概率密度函数,则漏警率公式为:

$$P_m = \int_{N_{th}}^{\infty} p[x/(n_s + n_0)] dx \quad (6)$$

式中, N_{th} 指比较器的阈值,以等同的电子电荷数目表达。 $n_0 = n_b + I_b \tau / q$, 其中 n_b 是被检测到背景光和杂散光所对应的光子平均数目, I_b 指 APD 膨胀漏电流。虚警是噪声电流超过阈值电流使系统有输出造成的。令 T_g 为距离门间隔,当 $\tau = T_g$ 时,发生在一个距离门内的虚警为 Poisson 分布,其概率为:

$$P_f = 1 - \exp \left[- \frac{T_g}{T_f} \right] \quad (7)$$

$1/T_f$ 为噪声超过阈值的平均比率,其表达式^[10]为:

$$\frac{1}{T_f} = \frac{1}{\tau} \int_{N_{th}}^{\infty} p(x/n_0) dx \quad (8)$$

$p(x/n_0)$ 为无光照情况下 τ 时间内被积分的 APD 输出,将 (8) 式代入 (7) 式,得到:

$$P_f = 1 - \exp \left[- (T_g / \tau) \int_{N_{th}}^{\infty} p(x/n_0) dx \right] \quad (9)$$

阈值 N_{th} 设置的依据是:使发生在一次距离门内的平均误触发次数充分小于 1。即 (9) 式中 $\exp$ 函数的自变量 $- [T_g / \tau] \int_N p(x/n_0) dx \ll 1$, 则 P_f 可以被近似为:

$$P_f = (T_g / \tau) \int_N p(x/n_0) dx \tag{10}$$

P_m 和 P_f 都是 APD 倍增因子和比较器阈值的函数。由于 (2) 式中的泊松表达式 $n^q e^{-n} / (q!)$ 使得数值计算中计算时间无限长, 为了简化分析, (2) 式可近似为:

$$p(m/n) = \frac{1}{(2\pi nG^2 F)^{1/2}} \times \frac{1}{1 + \frac{m - Gn}{nGF/(F - 1)}}^{3/2} \times \exp \left\{ - \frac{(m - Gn)^2}{2nG^2 F \left(1 + \frac{m - Gn}{nGF/(F - 1)} \right)} \right\}, (m > n) \tag{11}$$

然而, 该近似仅仅在 $m > n$ 时有效, 当 $m \leq n$ 时, $p(m/n)$ 的值仍由 (2) 式得到。

2 实验结果和讨论

将本算法运用于实际探测到的回波信号和噪声的检测。实验基于星载激光测高仪原理样机平台, 激光器选用半导体抽运 Nd:YAG 激光器, 波长为 1064nm, APD 选择 EG&G 公司的 C30954E^[12]。保持室温为 20℃ 情况下, 在给定虚警率条件下, 调节 APD 反向工作电压来寻找最佳倍增因子, 调节数字电位器来寻找比较器的最佳阈值电压。实验中的其它参量见表 1。

Table 1 Parameters used in experiment	
received laser pulse width	$\tau = 50\text{ns}$
APD ionization ratio	$k_{eff} = 0.010$
APD surface leakage current	$I_s = 12\text{nA}$
APD bulk leakage current	$I_b = 1\text{pA}$
APD load resistor	$R = 7500\Omega$
equivalent noise temperature	$T_e = 400\text{K}$
range gate interval	$T_g = 50\mu\text{s}$
noise photons	$n_0 = 10$
detected signal photons	$n_s = 200$

图 2 和图 3 中给出了虚警率与 APD 倍增因子、比

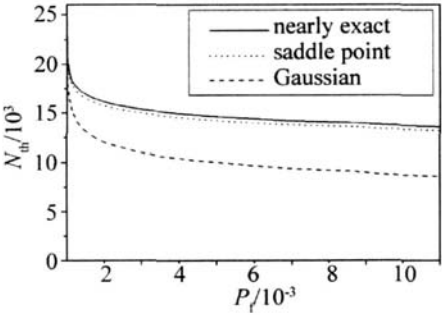


Fig 2 P_f versus optimal threshold level

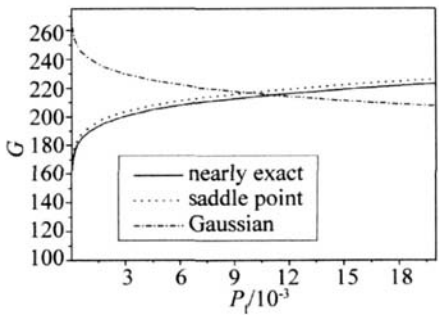


Fig 3 P_f versus optimal APD gain G

较器阈值之间的关系。 N_{th} 以电子电荷数目表示。从上述图表中可以看出, 采用鞍点算法获得的结果与使用近似算法十分相似, 但是在虚警率较高时, 鞍点近似结果有所偏差。采用高斯算法则结果误差很大, 因为这种传统算法将 APD 输出模拟为一个高斯变量。由图 2 和图 3 可知, 阈值 N_{th} 越高, 增益 G 越低, 虚警率 P_f 越低。增益过低, APD 输出信号幅值跟随降低, 阈值过高, 屏蔽噪声的同时将信号也屏蔽掉。当要求的虚警率为 0.3%, 按近似算法可得最佳增益 G 取 200, 最优阈值 N_{th} 取 16100 个电子电荷, 对应电压为 386mV。

在此条件下, 测高仪对固定目标测得的回波波形见图 4a, 其信噪比可高达 23:1, 而使用传统的算法分析, APD 的信噪比最高只能达到 6.69:1 (见图 4b)。

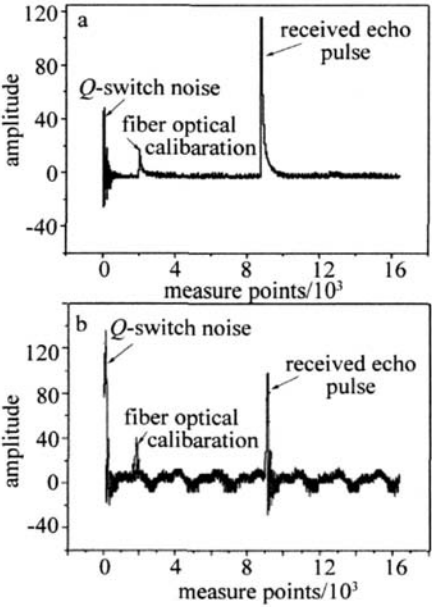


Fig 4 The received waveform using different analysis
a—using nearly exact analysis algorithm b—using traditional analysis

3 结 论

使用近似算法分析激光测高仪 APD 探测器的接收特性, 其优点在于其计算结果更可靠, 因为该算法使用了近似精确分布函数来模拟 APD 的输出, 直接计算虚警率和漏警率与增益、阈值之间的关系, 根据该结果

(下转第 634 页)

的锁模脉冲,重复频率为 280.2MHz,中心波长是 1556.235nm,线宽是 0.4nm,该实验研究结果对更加深入地了解被动锁模产生现象,及进一步开展后续研究具有极其重要的意义。

参 考 文 献

- [1] CKAO K, HOCKNAM G A. Dielectric-fiber surface wave-guide for optical frequencies [J]. *Proc IEEE*, 1966, 113: 1151-1158.
- [2] SARUWATOR IM. All-optical signal processing in ultrahigh-speed optical transmission [J]. *Electron Lett*, 1994, 32 (9): 98-105.
- [3] DESJURVIRE E. The golden age of optical fiber amplifiers [J]. *Physics Today*, 1994 (1): 20-27.
- [4] TAGA H. Long distance transmission experiments using the WDM technology [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14 (6): 1287-1298.
- [5] MA X H, YU J L, WANG L, *et al*. Clock recovery of single channel in OTDM system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19 (11): 1541-1545 (in Chinese).
- [6] HE H Ch, YANG L Zh, WANG Y C. Generation of 1.5ps pulses with 0.7nJ of energy based on polarization additive pulse mode-locking [J]. *Laser Technology*, 2007, 31 (1): 77-79 (in Chinese).
- [7] RICHARDSON D J, LAM NG R I, PAYNE D N, *et al*. Selfstarting passively mode-locked erbium fiber ring laser based on the amplifying Sagnac switch [J]. *Electron Lett*, 1991, 27 (6): 542-544.
- [8] DUL NG IN. Subpicosecond all-fiber erbium laser [J]. *Electron Lett*, 1991, 27 (6): 544-545.
- [9] RICHARDSON D J, LAM NG R I, PAYNE D N, *et al*. Pulse repetition rates in passive, selfstarting, femtosecond soliton fiber laser [J]. *Electron Lett*, 1991, 27 (16): 1451-1453.
- [10] ZRNGBL M, STULZ L W, HUGI J, *et al*. 2ps pulses from passively mode-locked laser diode pumped Er-doped fibre ring laser [J]. *Electron Lett*, 1991, 27 (19): 1734-1735.
- [11] WANG Z Y, YU Z H, GAO P L, *et al*. Rational harmonic figure-eight actively-passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1 (5): 283-285.
- [12] MORIKAWA T. An ultrafast reflective optical kerr demultiplexer using polarization rotation mirror [J]. *Electron Lett*, 1992, 28 (6): 521-522.
- [13] OMAHONY M J. Optical multiplexing in fiber networks: progress in WDM and OTDM [J]. *IEEE Communication Magazine*, 1995, 33 (12): 82-88.
- [14] SMITH K. All optical clock recovery using a mode-locked laser [J]. *Electron Lett*, 1992, 28 (19): 1814-1816.
- [15] ELLIS A D, SMITH K, PATRICK D M. All optical clock recovery at bit rates up to 40Gbit/s [J]. *Electron Lett*, 1993, 29 (15): 1323-1324.
- [16] YOSHIDA E, NAKAZAWA M. Low-threshold 115GHz continuous-wave modulational instability erbium doped fiber laser [J]. *Opt Lett*, 1997, 22 (11): 1409-1411.

(上接第 630页)

给定虚警率下设计 APD 反向工作电压和比较器阈值可以使探测器信噪比达到最大。鞍点算法由于对 APD 输出采用截断时刻发生函数来模拟,其计算结果精确度比近似算法略差。传统的高斯算法会引起显著的误差,因为高斯近似将 APD 的输出当作一个连续的高斯随机变量,而 APD 的输出分布函数只有在接近平均值时才可以看作高斯分布函数。

参 考 文 献

- [1] HELSTROM C W. Computing the performance of optical receivers with avalanche diode detectors [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1988, 36 (1): 61-66.
- [2] DAVISON F M, SUN X. Gaussian approximation versus nearly exact performance analysis of optical communication systems with PPM signaling and APD receivers [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1988, 36 (11): 1182-1192.
- [3] SUN X, DAVISON F M. Receiver characteristics of laser altimeters with avalanche photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28 (1): 268-271.
- [4] WANG L, YANG Zh J. Research of backscattered laser energy with the energy measurement for large caliber and high energy laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (1): 43-46 (in Chinese).
- [5] PALML S, HARTW, HLAVKA D. Geoscience laser altimeter system (GLAS) algorithm theoretical basis document version 3.0 [M]. Goddard, USA: NASA Goddard Space Flight Center, 1999: 66-89.
- [6] ABHIRE J B, SUN X, AFZAL R S. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis [J]. *Appl Opt*, 2000, 39 (15): 2440-2460.
- [7] PENG Q W, HE P K. Detecting probability and false alarming rate study of digital signal processor of laser ranger [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (5): 527-530 (in Chinese).
- [8] LI R D, ZHANG Zh P, YANG F M. The selection of optimal wavelength pairs for two-color satellite laser ranging [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (6): 645-648 (in Chinese).
- [9] MCINTYRE R J. The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: theory [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1972, 19 (6): 703-713.
- [10] CONRAD I J. The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: experimental [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1972, 19 (6): 713-718.
- [11] SUN B, WANG X B. Range-finding capability of laser range finder by extinction-ratio measurement without target [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (1): 82-84 (in Chinese).
- [12] EG&G Canada Ltd. Photodiode C30954E data sheet [M]. Arizona, USA: Electro Optics RCA Inc, 1991: 1-6.