

· 光电探测技术 ·

短脉冲激光信号接收灵敏度的研究

何初冬, 邱 琪

(电子科技大学, 四川 成都 610054)

摘要:采用直接探测短脉冲激光信号的方式, 基于信号检测中的探测概率、虚警概率理论, 详细推导了光接收机最小接收光功率. 阈值的选取对系统的探测性能有较大影响, 对实际系统分析表明, 在满足系统探测条件下, 通过阈值的合理选择, 可以使得总误判率达到最小值. 最后, 比较了 0.5~10 ns 脉宽下的最小接收光能量. 对激光雷达探测系统的设计和优化有一定的指导意义.

关键词:最小接收光功率; 探测概率; 虚警概率; 脉冲激光信号

中图分类号: TN911.25; TN215

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)02-0037-03

Receiving Sensitivity of Short-Pulse Laser Signals

HE Chu-dong, QIU Qi

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Minimal receivable power of optical receiver is deduced by the means of detecting directly micro-pulsed laser signals, on the base of two statistic concepts: false alarm probabilities and detection probabilities of signal detection theory. The threshold selection has an influences decisively on the detection. Analysis on a practical system indicates that threshold correctly selected can minimize total misjudgment rate in the condition of meeting the system detection demands. At last, the minimal laser energies received with different laser pulse width are compared.

Key words: minimal receivable power; detection probability; false alarm probability; pulse laser signals

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^[1]. 采用脉宽 1~10 ns 的激光脉冲和纳秒时间分辨率的电路, 在 5 900 km 的卫星轨道上就可以实现 2~5 cm 的测量精度^[2]. 星载激光测距系统可测量地极运动、地球板块漂移等重要地理现象, 并能对其他行星进行测绘^[1,3]. 机载激光测距系统可用来测量火山、海洋和冰川表面^[4]. 高信噪比的脉冲式激光测距系统, 只需要探测单个脉冲就可以得到距离信息, 而无需采用多次测量平均的方法. 当然, 采用多脉冲测距可以提高探测灵敏度, 从而使测距能力得到很大提高, 但会增加系统的复杂度^[5], 在具有相同激光能量的条件下, 脉冲宽度越窄, 脉冲的峰值功率越大, 激光测

距系统能够探测的距离就越远. 根据信号检测中的探测概率和虚警概率理论, 提出了极短脉冲激光信号探测系统最小可探测功率的计算方法, 并验证了激光脉冲越窄, 最小可探测光能量越小, 能够探测的距离就越远.

1 原 理

设探测系统接收的信号为

$$\begin{cases} r_s(t) = s(t) + n_s(t) & \text{有目标回波} \\ r_0(t) = n_0(t) & \text{无目标回波} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $s(t)$ 为目标反射信号; $n_s(t)$ 和 $n_0(t)$ 分别为有目标和无目标的随机噪声. 设 $r_s(t)$ 的概率密度

收稿日期: 2009-02-18

作者简介: 何初冬(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电探测系统方面的研究

是 $f_s(r)$, $n_0(t)$ 的概率密度是 $\varphi_0(t)$. 根据信号检测理论, 雷达探测概率 P_d 定义为, 接收到目标反射信号时, 正确判断到目标的概率.

$$P_d = \int_{I_t}^{\infty} f_s(r) dr \quad (2)$$

式中, I_t 为判决阈值电流. 虚警概率 P_{fa} 定义为没有接收到目标回波时, 将噪声判断为目标的概率

$$P_{fa} = \int_{I_t}^{\infty} \varphi_0(r) dr \quad (3)$$

脉冲激光信号接收系统大多采用 APD 和跨阻抗前置放大器^[6,7], 其电路形式如图 1 所示. 根据放大器的 $E_n - I_n$ 噪声模型, 可得到跨阻抗前置放大器的等效噪声模型, 如图 2 所示.

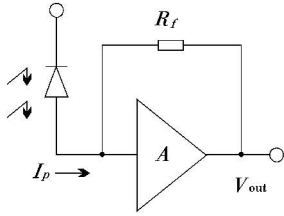


图 1 跨阻抗前置放大器

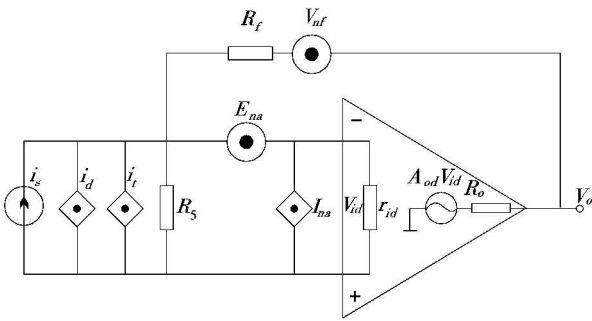


图 2 跨阻抗前置放大器的等效噪声模型

图 2 中, i_s 为信号电流; i_d 为散弹噪声电流; i_t 为源电阻热噪声电流; R_s 为源电阻; E_{na} 为运放的等效输入噪声电压; I_{na} 为运放的等效输入噪声电流; V_{nf} 为反馈电阻 R_f 的等效输入噪声电流.

为了研究方便, 先不考虑背景噪声的影响, 当接收到目标回波时, 接收机总的输入电流为^[8]

$$\begin{cases} I_1 = i_s + i_d + i_t & \text{有目标回波} \\ I_0 = i_t + \sqrt{2ei_{dd}B_N M^n} & \text{无目标回波} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中

$$\begin{cases} i_s = MP_r R_p \\ i_d = M^{\frac{n}{2}} \sqrt{2e(P_r R_p + i_{dd}) B_N} \\ i_t = \sqrt{\frac{4KTB_N NF}{R_s}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_r 是 APD 接收的回波信号光功率; M 是 APD 的倍增因子; R_p 是 APD 的灵敏度; e 是电子电荷; i_{dd} 是暗电流; $B_N = \frac{0.35}{t_r}$ 是噪声等效带宽; t_r 是目标回波脉冲信号上升时间; K 是波尔兹曼常数; T 为环境温度 (K); NF 为运放的噪声系数; R_s 是等效源输入阻抗; C_s 是 APD 的寄生电容; C_i 是运放的输入等效电容; n 是与二极管材料有关的系数, 对于 APD, $2.3 < n < 2.5$. 光接收机的信噪比为

$$SNR = \frac{M^2 P_r^2 R_p^2}{2eB_N M^n (P_r R_p + i_{dd}) + 4KTB_N NF / R_s} \quad (6)$$

根据信号检测理论^[9], 当探测到目标回波时, 接收机输入电流概率密度为

$$f_s(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(I - I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (7)$$

式中, σ_1^2 为接收到脉冲信号时噪声和的噪声方差, 且

$$\sigma_1^2 = i_t^2 + i_d^2 \quad (8)$$

当无目标回波时, 接收机输入电流概率密度为

$$\varphi_0(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(I_0 - I)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (9)$$

式中, σ_2^2 为未接收到脉冲信号时噪声和的噪声方差, 且

$$\sigma_2^2 = i_t^2 + 2ei_{dd}M^n B_N \quad (10)$$

总的错判率包括两部分: (1) 有目标回波时, 把回波脉冲信号判为噪声; (2) 无目标回波时, 把噪声判为有回波脉冲信号. 总的错判率为

$$TER = P(s)(1 - P_a) + P(0)P_{fa} \quad (11)$$

式中, $P(s)$ 为有目标回波信号的概率; $P(0)$ 为无目标回波信号的概率.

2 光接收机最小可探测光功率的计算

根据式(2)和式(7), 得到光接收机的探测概率为

$$P_d = \int_{I_t}^{\infty} f_s(r) dr = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_t - I_1}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) \quad (12)$$

式中, $erfc$ 代表补余误差函数, 定义为

$$erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy \quad (13)$$

根据式(3)和式(9), 得到光接收机的虚警概率为

$$P_{fa} = \int_{I_t}^{\infty} \varphi_0(r) dr = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{I_t - I_0}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) \quad (14)$$

令 $\frac{I_t - I_1}{\sqrt{2}\sigma_1} = \alpha$, $\frac{I_t - I_0}{\sqrt{2}\sigma_2} = \beta$, 因为 P_d 是所要求的最小值, P_f 是所要求的最大值, 所以有

$$\sqrt{2}\beta\sigma_2 + I_0 \leq I_t \leq \sqrt{2}\alpha\sigma_1 + I_1 \quad (15)$$

由式(5)、式(8)、式(10)和式(15), 整理得

$$i_s^2 - (2\sqrt{2}\beta\sigma_2 + 4M^{n-1}\sigma^2 eB_N) i_s + 2(\beta^2 - \alpha^2)\sigma_2^2 \geq 0 \quad (16)$$

设探测系统要求探测概率至少达到 99.99%, 虚警概率不能超过 0.1%, 则最小可探测光功率为

$$P_{rmin} = [2\sqrt{2}\beta\sigma_2 + 4M^{n-1}\alpha^2 eB_N + \sqrt{(2\sqrt{2}\beta\sigma_2 + 4M^{n-1}\alpha^2 eB_N)^2 - 8(\beta^2 - \alpha^2)\sigma_2^2}] / 2M \frac{\eta e}{h\nu} \quad (17)$$

3 计算实例及分析

设接收的脉冲信号波长是 $1.06 \mu\text{m}$, 1 ns 脉宽, 重复频率 1 MHz , 探测概率至少为 99.99%, 虚警概率不能超过 0.1%, $T = 343 \text{ K}$, $R_p = 0.64 \text{ A/W}$, $n = 2.4$, $C_s = 2 \text{ pF}$, $C_i = 1 \text{ pF}$, $t_r = \frac{1}{3} \text{ ns}$, $NF = 2$, 暗电流 $i_{dd} = 1 \text{ nA}$, $M = 100^{[6,10]}$. 根据前面推导, 得到最小接收光功率 $P_{rmin} = 1.40 \times 10^{-7} \text{ W}$. 在 $P_{rmin} = 1.40 \times 10^{-7} \text{ W}$ 时, 由式(6)得到 $SNR = 29.4$. 由式(15)有 $3.85 \times 10^{-6} \leq I_t \leq 5.08 \times 10^{-6}$, 在此取值范围内, 均能满足探测要求, 即探测概率至少为 99.99%, 虚警概率不能超过 0.1%. 根据式(11), 得到总的错误探测率 TER 与判决阈值 I_t 的关系曲线如图 3 所示. 由图 3 可得到, 在 $3.85 \times 10^{-6} \leq I_t \leq 5.08 \times 10^{-6}$ 条件下, $I_t = 5.08 \times 10^{-6}$ 时, 错误探测率达到最小值, 因此判决阈值取为 5.08×10^{-6} . 根据式(12)、式(14)得到, 在 $I_t = 5.08 \times 10^{-6}$ 时, 探测概率 $P_d = 99.99\%$, 虚警概率 $P_{fa} = 0.0004\%$ 满足系统要求.

APD 的响应时间很短, 约为 $0.5 \sim 1.0 \text{ ns}$, 频率响应可达几千兆赫兹^[11]. 在 APD 倍增增益 100, 探测概率至少为 99.99%, 虚警概率不能超过 0.1% 条

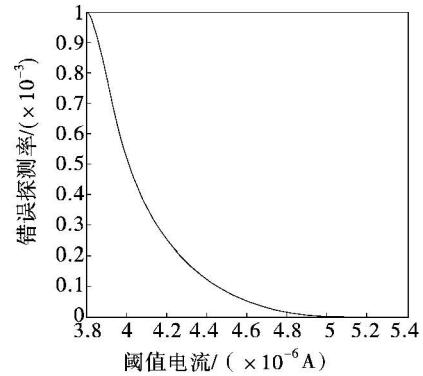


图 3 TER 随 I_t 变化关系曲线

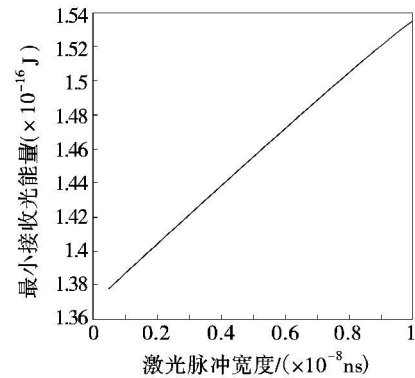


图 4 最小接收光能量与脉冲宽度关系曲线

件下, 根据式(17), 得到脉宽为 $0.5 \sim 10 \text{ ns}$ 激光脉冲下的最小接收光能量与脉冲宽度的关系曲线, 如图 4 所示. 由图 4 得到脉冲宽度越窄, 光接收机所能接收的最小光能量越小, 即在相同脉冲能量条件下, 脉冲宽度越小, 光接收机能够探测的距离就越远.

参考文献

- [1] 郭冠军, 李树楷. 利用硅雪崩二极管检测激光脉冲信号[J]. 中国激光, 2002, 29(6): 541-544.
- [2] John J Degnan. Satellite Laser Ranging: Current Status and Future Prospects[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1985, 23(4): 398-413.
- [3] 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.
- [4] J D Mulholland. Scientific Achievement from Ten Years of Lunar Laser Ranging [J]. Rev. Geophys. Space Phys., 1980, 18(4): 549-564.
- [5] 李松山. 激光多脉冲测距技术研究[D]. 长春: 长春理

(下转第 46 页)

3 氧化处理对异质电池效率的影响

当用 CVD 生长方法,生长 p-CdTe 多晶薄膜后,将其暴露在室温大气环境下,使其氧化,经 3-4 周后生成 CdO 和 TeO₂ 的氧化物混合网状结构,在氧化物层的上面,用溅射法生长 ITO,形成 n-ITO/i/p-CdTe 异质结,测试了有无氧化物层的异质结电池的效率. 结果发现,有氧化层的 n-ITO/i/p-CdTe 比无氧化层的同批生产的 n-ITO/p-CdTe 的电池效率高 2% 以上. 分析原因主要是氧化层减小了针孔,从而提高了开路电压和增大了短路电流,表 1 是实验对比测试结果.

表 1 有无室温氧化处理的异质结 ITO/p-CdTe 太阳电池效率比较

序号	生长温度/(°C)	有或无室温氧化处理	$V_{OC}/(V)$	$I_{sc}/(mA/cm^2)$	$\eta/(\%)$
1	600	无	0.77	28	8.1
2	600	有	0.80	31	10.2
3	630	无	0.81	33	8.5
4	630	有	0.84	36	10.4

4 结 束 语

采用 CVD 生长方法,控制生长温度达到控制 CdTe 多晶薄膜导电类型的目的,在国际上首次报导了同质 CdTe 多晶薄膜 p-n 结的生长. $I-V$ 曲线测量表明,具有明显的 p-n 结特性. CVD 生长方法

采用衬底温度控制导电类型和载流子浓度,其方法简便、易行、低成本,将大大有利于 CdTe 多晶薄膜的 p-n 结生长,有可能在太阳电池等方面得到应用. 此外,通过表面处理,暴露 p-CdTe 于大气环境中,使其缓慢氧化,形成网状氧化层,在助于提高异质结 CdTe 太阳电池的光电转换效率.

参考文献

- [1] 顾聚兴. 在硅衬底上研制大规格红外焦平面阵列[J]. 红外,2007,28(5):40-46.
- [2] P. Tribolet, G. Destefanis. Third generation and multi-color IRFAP developments: a unique approach based DE-FIR[J]. SPIE, Orlando, 2005, 5783:37.
- [3] 王育伟,刘小峰,陈婷婷,等. 薄膜太阳电池的最新进展[J]. 半导体光电,2008,29(2):151-157.
- [4] A. Bosio, N. Podesta, V. Canevari. Why CuiInGasez and CdTe polycrystalline thin film solar cells are more efficient than the corresponding single crystal[J]. Cryst. Res. Technol,2005, 40(10-11): 1048-1053.
- [5] X J Yi, L G Wang, X R Zhao. The growth and the characteristics of cadmium telluride thin films prepared by CVD[J]. J. Phys. D: Appl. Phys, 1988, 21:1755-1760.
- [6] X J Yi, Q L Liu, X R Zhao, et al. The effect of surface preparation on properties of cadmium telluride thin film heterojunctions[J]. J. Phys. D: Appl. Phys,1990,23: 912-915.
- [7] 易新建. 太阳电池原理与设计[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1989:218-219,288-260.
- [8] T L Chu, S S Chu, F Firszt, et al Deposition and characterization of p-type cadmium telluride[J]. films, J. Appl. Phys,1985,58:1349-1358.

(上接第 39 页)

- [6] 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙:国防科技大学,2005.
- [7] 王永刚. APD 探测器低噪声前端电子学研究[J]. 核电子学和探测技术,2006,26(3):280-283.
- [8] 杨祥林. 光纤通信系统[M]. 北京:国防工业出版社,

2003.

- [9] Jelalian A V. Laser radar system [M]. USA: Artech House,1992.
- [10] 吕晓玲. 半导体激光测距接收系统研究[D]. 长春:长春理工大学,2006.
- [11] <http://www.dzsc.com/data/html/2008-12-6/74580.html>.