

基于 APD 阵列三维成像激光雷达信噪比分析

任照明, 李 丽, 鄢冬斌

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要:基于雪崩光电二极管 APD 阵列的三维成像激光雷达采用激光单脉冲直接获取三维图像。为了仿真评估系统的性能,主要分析了 APD 阵列增益对系统信噪比和探测概率的影响, APD 阵列的阈值电压对系统探测概率的影响。仿真结果表明,当选取合适的 APD 阵列增益时,系统的信噪比和探测概率可以达到最大值; APD 阵列阈值电压的增大会降低系统的探测概率,并且对系统的探测概率影响很大。

关键词:激光雷达; APD 阵列; 信噪比; 探测概率

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

SNR analysis of 3D imaging lidar based on APD arrays

REN Xi-ming, LI Li, YANG Dong-bin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics Institute of Electronics and Information Engineering, Beijing 100191, China)

Abstract: 3D imaging LADAR based on APD arrays captures 3D image with single laser pulse. In order to emulate and evaluate the system performance, the signal-to-noise (SNR) and probability of detection (P_d) vs. the gain and threshold voltage of APD arrays were discussed in this paper. And the simulation results indicate that selecting an appropriate gain of APD arrays, the SNR and P_d can achieve the maximum; as threshold voltage of detector arrays increasing, it will reduce the probability of detection with a great influence.

Key words: lidar; APD arrays; signal-to-noise; probability of detection

1 引言

基于雪崩光电二极管 APD 阵列的三维成像激光雷达采用激光单脉冲直接获取三维图像。成像器件由 APD 阵列及其读出集成电路(ROIC)组成。为了仿真评估系统的性能,为系统总体设计提供依据,分析了系统的噪声源,给出了系统的噪声等效功率,同时结合系统使用要求合理地选择仿真参数,基于美国 BAE SYSTEMS 的 3D Flash LADAR 模型^[1]对 APD 阵列的信噪比和探测概率影响因素和变化规律进行了仿真和分析。

2 基于 APD 阵列三维成像激光雷达系统

基于 APD 阵列三维成像激光雷达系统工作原理如图 1 所示,脉冲激光经发射光学系统扩束后照射到目标场景上,接收光学系统收集回波信号光并

投射到 APD 阵列上,读出集成电路(ROIC)对 APD 阵列中每一个像元的数据进行并行处理,每个像元

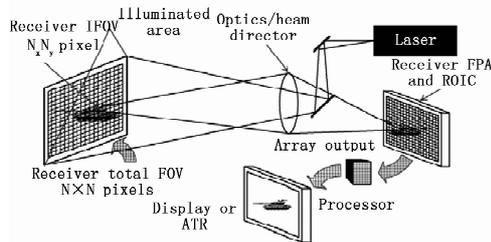


图 1 基于 APD 阵列三维成像激光雷达系统工作原理

基金项目:航空科学基金项目(No. 20070151002);预研基金项目(No. 9140A01010108HK0128)资助。

作者简介:任照明(1985-),男,硕士研究生,主要从事激光成像,光电探测,图像处理等方面研究。E-mail:rxmbit@gmail.com

收稿日期:2009-08-12;修订日期:2009-09-24

单独测量激光脉冲的往返时间、目标角位置。因此，每个像元的作用相当于一个激光测距机，从而获取目标的角-角-距离图像 (Angle-Angle-Range)^[2]。其中 APD 工作在盖革模式^[3-4]下，即反向偏置电压高于雪崩电压的工作方式，具有单光子探测能力。

3 噪声源分析

系统的噪声主要有外部噪声和内部噪声。外部噪声主要有大气的后向散射和太阳光辐射引入的噪声。内部噪声主要是 APD 的暗电流噪声和热噪声。

3.1 大气后向散射噪声电流

$$i_{\text{bscat}} = \frac{R_\lambda A_{\text{rec}} T_{\text{emit}} T_{\text{rec}} \sigma \beta_{\text{scat}} \beta \frac{c}{2} E_L \exp[-2\alpha_0 r_{\text{obs}} \beta_{\text{scat}}]}{R_s(l)^2} \quad (1)$$

式中， R_λ 为探测器灵敏度； A_{rec} 为探测器有效面积， T_{emit} 、 T_{rec} 分别是发射与接收光学系统透过率； σ 是消光系数； β_{scat} 是散射消光系数比； β 是散射方向与照明方向成 180° 时的散射系数； c 为光速； E_L 为发射激光能量； α_0 为大气质量消光系数； r_{obs} 为探测器到最近散射点的距离； $R_s(l)$ 是散射点与系统之间的距离。

3.2 太阳噪声电流

$$i_{\text{solar}} = \frac{R_\lambda \Delta\lambda \rho E_\lambda N^4 d^4 \pi T_{\text{emit}} T_{\text{rec}} \exp(-\alpha R)}{8R^2} \quad (2)$$

式中， $\Delta\lambda$ 为滤光片光谱带宽； ρ 为目标反射率； d 为接收像元有效面积； N^2 为像元数； E_λ 为太阳光谱辐照度； α 为大气衰减系数。

3.3 暗电流

$$i_{\text{drk}} = J_{\text{drk}} A_{\text{det}} \quad (3)$$

式中， J_{drk} 是单位面积暗电流； A_{det} 是探测器有效面积。

3.4 热噪声电流

热噪声是电阻中电子的热运动引起的噪声电流，热噪声电流为：

$$i_{\text{nl}} = \sqrt{\frac{4kTB_w}{R_l}} \quad (4)$$

式中， R_l 为 APD 探测器的负载电阻； k 为玻耳兹曼常数； T 为热力学温度^[5]， B_w 为探测器噪声带宽。

3.5 噪声等效功率

上述四种主要噪声对 APD 探测阵列的影响由噪声等效功率式(5)体现：

$$\text{NEP} = \frac{\sqrt{i_{\text{nl}}^2 + 2q(i_{\text{scat}} + i_{\text{solar}} + i_{\text{dark}})M^2 [k_e M + (2 - \frac{1}{M})(1 - k_e)] B_n}}{R_\lambda M} \quad (5)$$

式中， q 为电子电荷； M 探测器增益； k_e 为电离率； B_n 为探测器噪声带宽。

4 信噪比和探测概率仿真

信噪比 SNR 定义为信号的峰值功率与噪声功率的均方根值的比值。基于 APD 阵列的三维成像激光雷达系统信噪比可由公式(6)表示^[1]：

$$\text{SNR} = \frac{\left\{ \frac{E_L}{bt\sqrt{\pi}} e^{-2\left[\frac{(e1-\text{mid})\text{IFOV}}{bw_s}\right]^2} e^{-2\left[\frac{(e2-\text{mid})\text{IFOV}}{bw_s}\right]^2} \right\}}{\text{NEP}\pi R^2} \times$$

$$\eta_B \rho e^{-2(\alpha R + \alpha_s r_{\text{obs}} \beta_{\text{rat}})} \times T_{\text{opt}} \times A_{\text{rec}} \quad (6)$$

式中， η_B 是在视场 (FOV) 中的几何重叠因子；IFOV 是瞬时视场。

在直接检测方式下，探测器接收到大量光子，并产生大量的光电子，其噪声出现的概率密度函数可以用高斯概率密度函数来表示。在线性放大条件下，探测器的信号噪声、暗电流噪声、背景噪声和热噪声等噪声之和仍然具有高斯分布的统计特性^[6]。探测概率为：

$$P_d = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{\text{SNR} - \text{TNR}}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (7)$$

式中，TNR 为阈值噪声比。根据 S. O. Rice 的统计检测理论，脉冲检测受限系统的阈值噪声比 (TNR) 可表示为^[6]：

$$\text{TNR} = \left[2 \ln \left(\frac{2R_{\text{max}} B_n}{\sqrt{3} c \text{FAR}} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中，FAR 为平均虚警概率； R_{max} 为最大探测距离。

综合考虑 APD 室温工作下的量子效率、电离率和灵敏度等特性，选择 InGaAs/InP APD 作为 1550 nm 波长单光子探测器^[5,7]。仿真中的 APD 采用美国 voxtel 公司的 VGG-GAK NIR Geiger-Mode APD，增益 $M = 1$ 时，其参数为：量子效率 $\eta = 60\%$ ，电离率 $k = 0.45$ ，灵敏度 $R_l = 0.7 \text{ A/W}$ ($\lambda = 1550 \text{ nm}$)。采用微片激光器，输出光强服从高斯分布。仿真参数参考如表 1 所示。

信噪比 SNR 和探测概率 P_d 仿真结果如图 2、图 3 所示。在 1000 m 外放置 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 参考物所得信噪比 SNR 分布和探测概率 P_d 分布仿真结果如图 4、图 5 所示。

表1 仿真参数

物理量	参数
λ	1550 nm
Power(E_L)	300 μ J
Divergence Angle	10 mrad
σ	1.55 km^{-1}
T_{emit}	0.8
T_{rec}	0.6
β_{scr}	0.0545
β	0.994
α_0	0.74 km^{-1}
η_B	0.9
I FOV	50 μ rad
APD Pixels	128 \times 128
Pixel interval	100 μ m
Effective Diameter	30 μ m
Absolute Range	1000 m
M	60

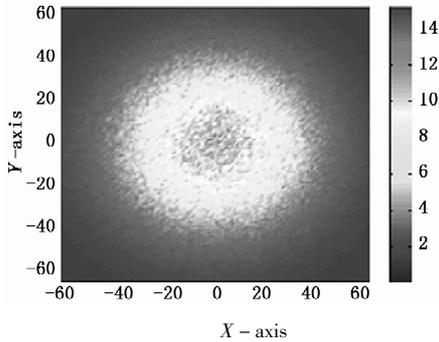


图2 信噪比 SNR 分布

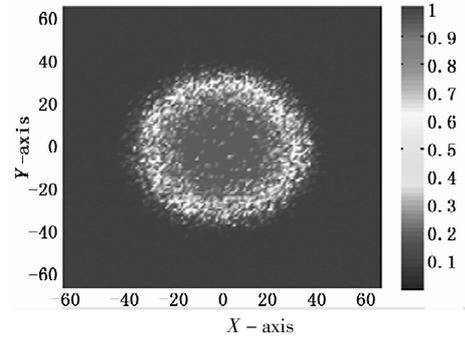


图3 探测概率 Pd 分布

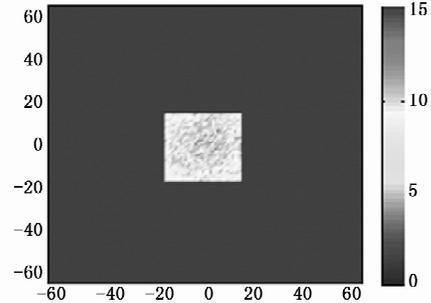


图4 参考物信噪比 SNR 分布

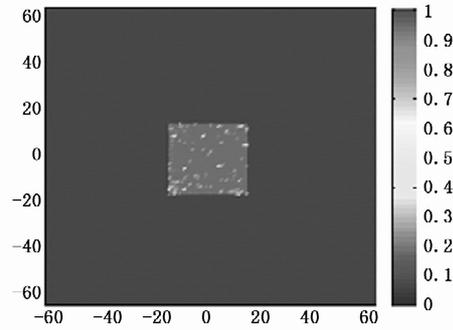


图5 参考物探测概率 Pd 分布

5 影响系统性能因素分析

5.1 APD 阵列增益对系统性能的影响

依次改变 APD 阵列增益 $M = 10, 60, 200$, 其他参数保持不变, 对系统信噪比 SNR 和探测概率 P_d

进行仿真。结果如图6所示, APD 阵列增益 10 由变为 60 时, 系统信噪比和探测概率由小变大, APD 阵列增益 60 由变为 200 时, 系统信噪比和探测概率由小变大。

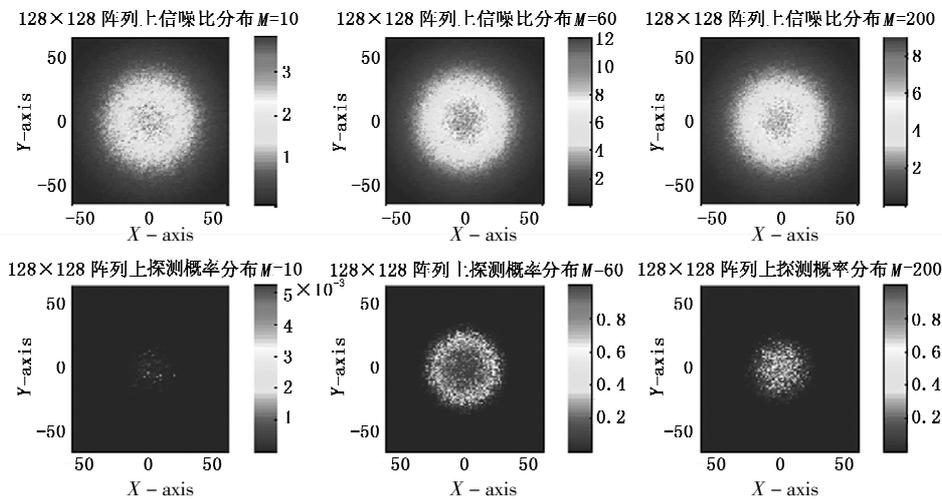


图6 调整探测阵列增益对应的信噪比与探测概率

系统信噪比和探测概率随着 APD 阵列增益变化仿真结果如图 7 所示,曲线出现了信噪比和探测概率极大值点,选择极大值点附近的探测阵列的增

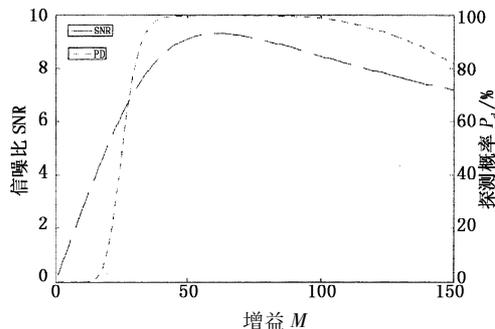


图 7 信噪比 SNR 和探测概率 P_d 与增益 M 的关系

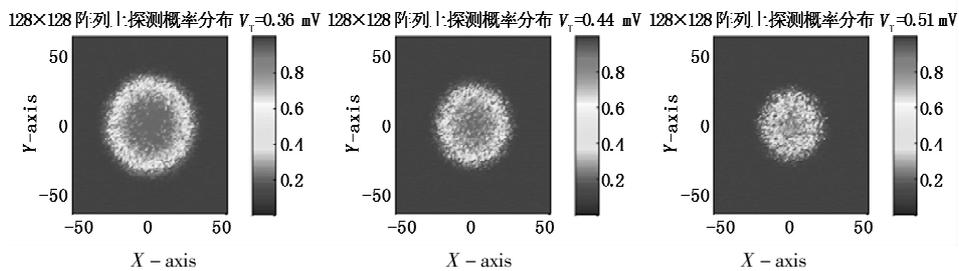


图 8 调整探测阵列阈值电压对应探测概率

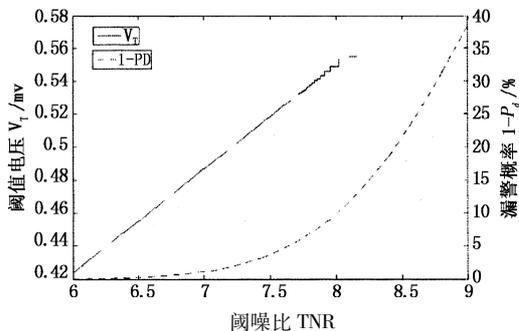


图 9 探测器阈值电压 V_T 和漏警概率 $1 - P_d$ 与 阈噪比 TNR 的关系

APD 阵列阈值电压 V_T ,漏警概率 $(1 - P_d)$ 与阈噪比 TNR 三者之间的关系仿真结果如图 9 所示,在阈噪比一定的情况下,探测器阈值电压 V_T 平均增加 0.02 mV 会导致探测概率 5% 的下降。

6 结论

基于美国 BAE SYSTEMS 的 3D Flash LADAR 模型,结合实际系统设计进行了信噪比和探测概率的仿真和分析。结果表明:在 APD 阵列增益选定某一值时,系统的信噪比和探测概率有最大值,可以以此为依据选取合适的 APD 阵列的增益。APD 阵列阈值电压 V_T 的增大,会降低系统的探测概率。在阈噪比一定的情况下,APD 阵列阈值电压 V_T 平均增加 0.02 mV 会导致探测概率 5% 的下

降,APD 阵列阈值电压的选取对系统的探测概率影响很大。

5.2 探测阵列阈值电压对系统性能的影响

阈噪比定义:

$$TNR = \frac{V_T}{V_{n1}} \tag{9}$$

式中, V_T 为探测阈值电压; V_{n1} 为无激光回波信号时噪声的电压均方根值。

依次改变 APD 探测阵列阈值电压 $V_T = 0.36 \text{ mV}, 0.44 \text{ mV}, 0.51 \text{ mV}$,其他参数保持不变,对系统探测概率 P_d 进行仿真,结果如图 8 所示,可见随着 APD 阵列阈值电压 V_T 的增大,系统探测概率 P_d 变差。

降,APD 阵列阈值电压的选取对系统的探测概率影响很大。

参考文献:

- [1] Robert J Grasso, George F Dippel, Leonard E Russo. A model and simulation to predict 3D imaging lidar sensor systems performance in real-world type environment [J]. SPIE, 2006, 6303: 1 - 12.
- [2] 李琦,迟欣. 基于盖革模式 APD 阵列的单脉冲 3D 激光雷达原理和技术 [J]. 激光与红外, 2006, 36 (12): 1116 - 1119.
- [3] 寇松峰,陈钱. 基于 4 元 APD 阵列的激光测距技术研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38 (6): 537 - 540.
- [4] Brian F Aull, Andrew H Loomis, Douglas J Young, et al. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13 (2): 335 - 336.
- [5] 孙志斌,马海强,雷鸣. 近红外单光子探测器 [J]. 物理学报, 2007, 56 (10): 5790 - 5796.
- [6] Yura H T. Threshold detection in the presence of atmospheric turbulence [J]. Appl. Opt., 1995, 34 (6): 109721102.
- [7] Bruno Dion, Patrick Lepage, Nick Bertone. High performing photodiodes for demanding applications [C]. Leos Summer Topical Meetings, 2006 (20): 29 - 32.