

四 Gm-APD 探测器提高激光雷达探测性能的研究

徐璐,张勇,张宇,杨旭,杨成华,王强,赵远

(哈尔滨工业大学理学院物理系,黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:提出了一种四 Gm-APD 单次探测的激光雷达系统,该系统采用 2×2 的光纤阵列同时接收回波脉冲,利用四通道实时比对得到目标的距离信息。计算了该系统探测概率、虚警概率和测距精度,并与传统单 Gm-APD 四次累积探测激光雷达系统进行相互比较。结果表明,四 Gm-APD 激光雷达系统不仅能够使探测速度提高到 4 倍,其探测性能也都明显优于单 Gm-APD 四次累积探测的激光雷达。探测概率从 60.6% 提高到了 91.6%,虚警概率从 1.9% 下降到了 0.2%,测距精度从 1.771 m 提高到了 0.440 m。最后,分别对两个系统进行了 64×64 像素的距离像仿真,仿真结果验证了该方法的正确性。

关键词: Gm-APD 激光雷达; 光子计数; 探测概率; 虚警概率; 测距精度

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2583-05

Four Gm-APDs photon counting imaging lidar to improve detection performances

Xu Lu, Zhang Yong, Zhang Yu, Yang Xu, Yang Chenghua, Wang Qiang, Zhao Yuan

(Department of Physics, School of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A photon counting imaging lidar system with four Geiger-mode avalanche photodiode (Gm-APD) detectors was proposed. A 2×2 optical fiber array was used in the system to receive echo pulse simultaneously. The distance of the target was obtained through the signals of the four channels in real time. The detection probability, the false alarm probability and the range accuracy of the lidar system were calculated. Comparing with the single Gm-APD system, the detection performances were all significantly improved the detection probability was improved from 60.6% to 91.6%, the false alarm probability was restrained from 1.9% to 0.2%, and the range accuracy was improved from 1.771 m to 0.440 m. By mean of the 64×64 pixels range imaging simulations of the single Gm-APD system and the approach in this paper, the validity of the theoretical derivation is demonstrated.

Key words: Gm-APD lidar; photon counting; detection probability; false alarm probability; range accuracy

收稿日期:2015-01-15; 修订日期:2015-02-14

基金项目:国家自然科学基金(61450002);青年科学基金(61108072)

作者简介:徐璐(1988-),男,博士生,主要从事光子计数激光雷达方面的研究。Email:xlhit@126.com

导师简介:张宇(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事光电信号检测的理论、激光探测的理论实验、光折变非线性光学等方面的研究。Email:zhangyunn@hit.edu.cn

0 引言

成像激光雷达在近 10 年来发展十分迅速,并广泛地应用于地形测绘、太空探测等^[1]。随着人们对于弱信号探测的要求越来越高,光子计数成像激光雷达被提出^[2]。其中,Gm-APD 光子计数激光雷达在这一领域有着举足轻重的地位^[3]。

由于 Gm-APD 特殊的工作模式,它存在着死时间,并且对信号的强度没有响应,因此只能输出数字信号 0 和 1^[4]。与其它光子计数激光雷达不同,针对 Gm-APD 另外发展了一整套的探测理论^[5]。Johnson 等人首先提出了 Gm-APD 的信号和噪声的统计模型^[6]。他们将探测区间分割成许多离散的小区间,分析了 Gm-APD 的信号和噪声的分布,采用泊松统计理论计算 Gm-APD 在每个小区间内的雪崩概率。由于 Gm-APD 的单光子灵敏度和死时间的存在,噪声影响大,因此,如何有效地降低背景噪声的影响一直以来都是研究重点。Kong 等人提出了一种自聚焦技术提高 Gm-APD 阵列激光雷达空间分辨率的方法^[7]。他们还提出了采用两个 Gm-APD 迅速降低虚警概率的方法^[8]。Zhang 等人提出了一种基于阵列 Gm-APD 的实时噪声滤波降低虚警概率的方法^[9]。国内对于光子计数激光雷达也有了一些研究^[10-13]。在之前的论文中^[14],研究了 Gm-APD 激光雷达多脉冲探测概率和虚警概率,在此基础上,文中提出了一种四 Gm-APD 单次探测提高激光雷达的探测性能的方法,并与之前的单 Gm-APD 四次累积探测研究进行了比较。

1 四 Gm-APD 光子计数激光雷达系统

图 1 为四 Gm-APD 探测器激光雷达系统的结构示意图。主时钟(Master clock)给出一个起始信号,信号发生器(Sync signal generator)产生一个触发信号,触发激光器(Laser)发射激光脉冲,与此同时时钟开始计时。激光脉冲经过 X-Y 扫描系统(X-Y scanning),再经过发射系统(Transmitting system)变成小光斑照射到目标(Target),经目标反射的激光脉冲通过接收系统(Receiving system)接收,再通过窄带滤波片(Narrow bandpass filter,NBPF)滤波,最后汇聚到一个 2×2 的光纤阵列上,通过光纤耦合到四个 Gm-APD 探测器上,探测器产生雪崩脉冲并截止时

钟计时,经过数据处理系统(Data acquisition)处理得到目标的距离信息,最后由计算机(Computer)显示。为了降低背景噪声的影响,选通门控制系统(Strobing gate control)控制选通门在目标前后的一段时间内开启,探测器只能在这段时间内有响应。

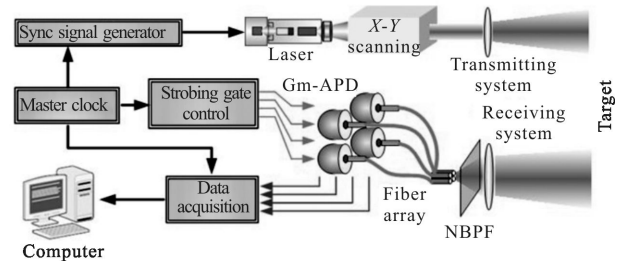


图 1 四 Gm-APD 探测器激光雷达系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of four Gm-APDs photon counting imaging lidar system

图 2 为四 Gm-APD 光子计数激光雷达探测过程示意图。激光器发射激光脉冲照射目标,从目标返回的回波脉冲被 Gm-APD 接收并产生信号光电子。探测器在整个选通区内都会产生噪声光电子(包括背景噪声和热噪声),噪声光电子可以认为平均分布在选通区内。噪声光电子和信号光电子都有可能触发 Gm-APD 产生雪崩脉冲,但信号光电子触发雪崩的概率高。四个探测器分别产生雪崩脉冲,由于噪声平均分布在选通区内,噪声触发雪崩具有随机性,而信号触发雪崩的位置不变,因此可以利用此特点进行四个通道的实时对比提取信号。在探测过程中,四个探测器中至少有两个探测器在同一位置输出即为系统的输出信号。

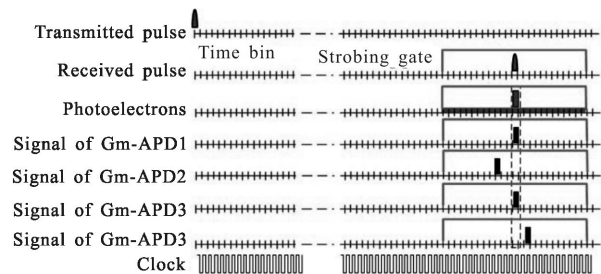


图 2 四 Gm-APD 光子计数激光雷达探测过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of detection process of four Gm-APDs photon counting lidar

2 探测性能的分析

Gm-APD 在时间 $t_1 \sim t_2$ 内产生雪崩脉冲的概率

$P(t_1, t_2)$ 为:

$$P(t_1, t_2) = \exp[-M(0, t_1)] \cdot \{1 - \exp[-M(t_1, t_2)]\} \quad (1)$$

式中: $\exp[-M(0, t_1)]$ 表示在时间 $0 \sim t_1$ 内没有发生雪崩的概率; $1 - \exp[-M(t_1, t_2)]$ 表示在时间 $t_1 \sim t_2$ 发生雪崩的概率。

在图2中,计时时钟的频率为1 GHz,时钟周期为1 ns,即时间区间(Time bin)的宽度 Δt 为1 ns。选通门宽度为200 ns,选通门开启时刻的位置为 G_0 ,关闭时刻的位置为 G 。目标的位置为 T ,处于选通门的中间位置。从目标返回的激光脉冲信号在每个 Gm-APD 产生的平均信号光电子数为 $S/4$,每个时间区间内每个 Gm-APD 产生的背景噪声光电子数为 $n/4$,每个时间区间内 Gm-APD 的热噪声电子数为 n_0 。晴朗白天阳光背景噪声为8 MHz,探测器暗计数率为100 kHz。考虑整个时钟计时过程中的第 i 个时间区间,根据公式(1)可以得到第 i 个时间区间 Gm-APD 产生雪崩的概率 P_i ,如表1所示。

表1 任意时间区间内 Gm-APD 产生雪崩事件的概率

Tab.1 Probability of each Gm-APD fires in the i th time-bin

Location of time-bin	Probability of avalanche incident
$1 \leq i < G_0$	$P_i = 0$
$G_0 \leq i < T$	$P_i = \exp[-(i - G_0)(n/4 + n_0)] \cdot [1 - \exp(-n/4 - n_0)]$
$i = T$	$P_i = \exp[-(T - G_0)(n/4 + n_0)] \cdot [1 - \exp(-S/4 - n/4 - n_0)]$
$T < i \leq G$	$P_i = \exp[-(i - G_0)(n/4 + n_0) - S/4] \cdot [1 - \exp(-n/4 - n_0)]$
$i > G$	$P_i = 0$

根据光子激光雷达方程求得从目标返回的激光脉冲在四个 Gm-APD 产生总的平均信号光电子数 S 为:

$$S = E_p \frac{\lambda}{hc} T_{\text{emit}} T_{\text{rec}} T_{\text{atm}}^2 \rho_L \frac{A}{2\pi R^2} \beta \eta_q \quad (2)$$

式中: E_p 为发射激光脉冲的能量; λ 为激光器的波长,532 nm; h 为普朗克常数, $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; c 为光在大气中的传播速度, $3 \times 10^8 \text{ m/s}$; T_{emit} 为发射光学系统的透过率,0.7; T_{rec} 为接收光学系统的透过率,0.8; T_{atm} 为大气的单程透过率,0.6; ρ_L 为目标的反射率,0.2; A 为接收望远镜的接收孔径的面积, $10^{-2} \pi/4 \text{ m}^2$ (直径为10 cm); R 为目标的距离,1.5 km; β 为窄带滤波片对于波长为532 nm 单色光的透过率,0.7; η_q 为

探测器对于波长为532 nm 激光响应的量子效率,0.5。

激光器发射的激光脉冲为高斯波形,

$$P(t) = P_0 \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma_{\text{pulse}}^2}\right) \quad (3)$$

式中: P_0 为发射激光脉冲的峰值功率,500 W; σ_{pulse} 为脉冲宽度,300 ps。发射激光脉冲的能量 E_p 可以通过

$$E_p = \int P(t) dt = P_0 \sqrt{2\pi} \sigma_{\text{pulse}} \text{ 计算得到。}$$

四 Gm-APD 激光雷达系统的探测概率 PD 定义为系统输出的信号在目标位置的概率,即四个探测器中至少有两个探测器在目标位置发生雪崩的概率:

$$\text{PD} = 6P_T^2(1 - P_T)^2 + 4P_T^3(1 - P_T) + P_T^4 \quad (4)$$

虚警概率 PFA 定义为系统输出的信号在非目标位置的概率,即四个探测器中至少有两个探测器在非目标位置发生雪崩的概率:

$$\text{PFA} = \sum_{i=G_0}^G (6P_i^2(1 - P_i)^2 + 4P_i^3(1 - P_i) + P_i^4) - \text{PD} \quad (5)$$

测距的标准偏差,即测距精度 σ_R ,根据统计学中标准偏差的定义计算得到:

$$\sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{i=G_0}^G (6P_i^2(1 - P_i)^2 + 4P_i^3(1 - P_i) + P_i^4) \cdot (i\Delta t c/2)^2}{\sum_{i=G_0}^G (6P_i^2(1 - P_i)^2 + 4P_i^3(1 - P_i) + P_i^4)} - \left[\frac{\sum_{i=G_0}^G (6P_i^2(1 - P_i)^2 + 4P_i^3(1 - P_i) + P_i^4) \cdot (i\Delta t c/2)^2}{\sum_{i=G_0}^G (6P_i^2(1 - P_i)^2 + 4P_i^3(1 - P_i) + P_i^4)} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

将上述所有参数代入公式(4)~(6),可以得到四 Gm-APD 激光雷达系统的探测概率 PD 为91.6%,虚警概率 PFA 为0.2%,测距精度 σ_R 为0.440 m。

如果系统没有采用四 Gm-APD 探测器,而是利用单个 Gm-APD 探测器进行四次累积探测时。在表1中,探测器产生的回波信号光电子数为 S ,背景光电子数为 n 。探测性能的表达式还是如公式(4)~(6)所示,可以得到单个 Gm-APD 探测器进行四次累积探测激光雷达系统的探测概率 PD_4 为60.6%,虚警概率 PFA_4 为1.9%,测距精度 σ_{R4} 为1.771 m。

如表2所示,四 Gm-APD 激光雷达系统与传统的单 Gm-APD 四次累积探测激光雷达系统相比较,不仅探测速度提高到了4倍,而且探测性能有了很大的提高。探测概率从60.6%提高到了91.6%,虚警

概率从 1.9% 下降到了 0.2%, 测距精度从 1.771 m 提高到了 0.440 m。

表 2 两个系统探测性能的比较

Tab.2 Detection performances comparison between the two systems

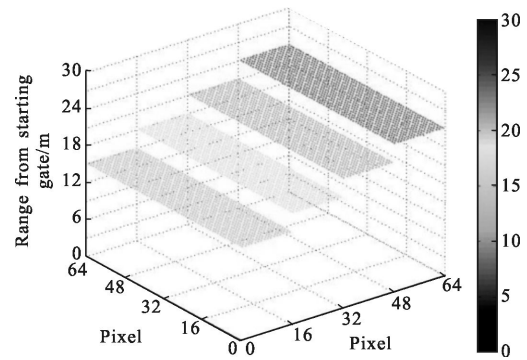
Detection performance	Four pulses detection with a Gm-APD	One pulse detection with four Gm-APDs
Detection probability PD	60.6%	91.6%
False alarm probability PFA	1.9%	0.2%
Range accuracy σ_R/m	1.771	0.440

四 Gm-APD 激光雷达系统与传统的单 Gm-APD 四次累积探测激光雷达系统相比, 探测性能有了很大提高, 根本原因是 Gm-APD 对入射的信号光电子的响应有个饱和区域。笔者之前的研究工作^[14]中已经指出, 当入射光电子数达到四个时, Gm-APD 的响应已经达到饱和区域。因此, 当入射光被分成四束照射到 Gm-APD 上时, 虽然信号光被衰减了四倍却仍处于饱和区域附近, 但同时背景噪声也被衰减了四倍, 而在总体效果上, 探测性能却得到了提高。

3 距离像仿真分析

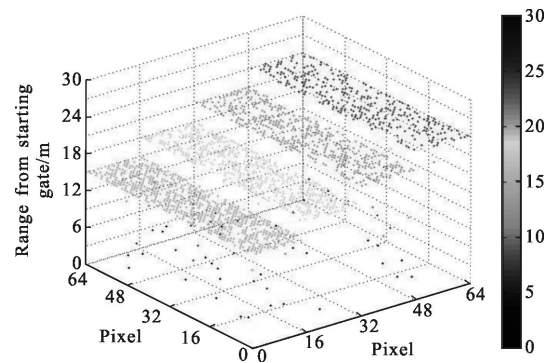
为了更直观地体现四 Gm-APD 探测器激光雷达系统的探测性能的提高, 设计了一个 64×64 像素点的距离像仿真系统。如图 3(a) 所示, 仿真目标为一个有梯次感的平板结构, 其中第一块平板距离探测器 1.5 km 处, 每块平板之间相距 3 m, 并且前后互不遮挡。选通门宽度 200 ns, 选通门开启时刻为 $9.9 \mu\text{s}$, 即第一块平板距离选通门开启位置相距 15 m。在图 3(a) 的平板目标结构中, 总像素点为 64×64 , 纵坐标起始距离为 1 485 m, 深浅表示距离。图 3(b) 为单 Gm-APD 四次累积探测的成像结果, 图 3(c) 为四 Gm-APD 单次探测的成像结果。表 3 为成像结果的评价: 单 Gm-APD 四次累积探测系统的虚警像素点 (False alarm pixels) 个数为 95, 漏警像素点 (False dismissal pixels) 个数为 2 241, 即该次成像探测的虚警概率为 2.3%, 漏警概率为 54.7%; 四 Gm-APD 单

次探测系统的虚警像素点 (False alarm pixels) 个数为 12, 漏警像素点 (False dismissal pixels) 个数为 555, 即该次成像探测的虚警概率为 0.29%, 漏警概率为 13.5%。



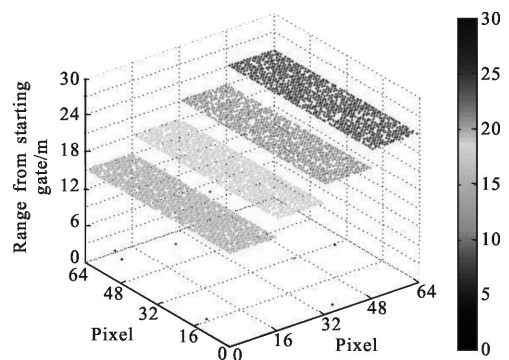
(a) 平行板目标

(a) Parallel plate targets



(b) 单 Gm-APD 四次累积探测

(b) Four pulses detection with a Gm-APD



(c) 四 Gm-APD 单次探测

(c) One pulse detection with four Gm-APDs

图 3 64×64 像素距离像仿真结果, 深浅表示距离, 纵坐标起始位置表示 1 485 m

Fig.3 64×64 pixels range imaging simulation results.

Color represents the distance, and initial distance of ordinate is 1 485 m

表 3 64×64 像素成像仿真结果评价
Tab.3 Evaluation of 64×64 pixels imaging simulation results

64×64 pixels range imaging simulation	Four pulses detection with a Gm-APD	One pulse detection with four Gm-APDs
False alarm probability	2.3%	0.29%
False dismissal probability	54.7%	13.5%

距离像仿真结果表明,采用四 Gm-APD 单次探测的成像结果明显比单 Gm-APD 四次累积探测的成像结果要好,不仅成像帧频会提高到原来的四倍,而且虚警像素点和漏警像素点都有很大的减少,对于目标的成像更清晰可靠,更易于识别目标。

4 结论

由于 Gm-APD 的单光子灵敏度和死时间的影响,噪声对 Gm-APD 激光雷达的影响显得尤为突出。如何有效降低噪声的影响,提高 Gm-APD 的探测性能历来都是人们的研究重点。文中提出了一种四 Gm-APD 单次探测进一步提高激光雷达探测性能的方法。对于 1.5 km 目标的探测,该系统不仅探测速度提高了四倍,而且,探测概率从 60.6% 提高到了 91.6%,虚警概率从 1.9% 下降到了 0.2%,测距精度从 1.771 m 提高到了 0.440 m,探测性能有了显著的提高。最后对两个系统进行了 64×64 像素的距离像仿真,仿真结果有效地验证了结论地正确性。

参考文献:

- [1] MacFaden S W, O'Neil-Dunne J P M, Ryar A R, et al. High-resolution tree canopy mapping for New York City using LIDAR and object-based image analysis[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6: 063567.
- [2] Degnan J, Wells D, Machan R, et al. Second generation airborne 3D imaging lidars based on photon counting [C]// SPIE, 2007, 6771: 67710N.
- [3] Marino R M, Davis W R. Jigsaw: A Foliage-Penetrating 3D Imaging Laser Radar System [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23-36.
- [4] Aull B F, Loomis A H, Young D J, et al. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 335-350.
- [5] Fouche D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(37): 5388-5398.
- [6] Johnson S, Gatt P, Nichols T. Analysis of Geiger-mode APD laser radars [C]//SPIE, 2003, 5086: 359-368.
- [7] Oh M S, Kong H J, Kim T H, et al. Autofocus technique for three-dimensional imaging, direct-detection laser radar using Geiger-mode avalanche photodiode focal-plane array [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4214-4216.
- [8] Kong H J, Kim T H, Jo S E, et al. Smart three-dimensional imaging lidar using two Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19323-19329.
- [9] Zhang Z, Zhao Y, Zhang Y, et al. A real-time noise filtering strategy for photon counting 3D imaging lidar [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9247-9254.
- [10] Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, et al. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3234-3238. (in Chinese)
- [11] Zhang Guoqing, Liu Lina, Zhun Changjun. Detection and false-alarm probabilities based on Multi-Pixel Photon Counter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (7): 1819-1824. (in Chinese)
- [12] He Weiji, Sima Boyu, Miao Zhuang, et al. Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2488-2494. (in Chinese)
- [13] Bu Shaofang, Ni Qiliang, He Lingping, et al. Microchannel plate photon counting detector in UV range [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 302-309. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)