

文章编号 1004-924X(2018)05-1175-06

## 基于光子计数激光雷达的时域去噪

骆 乐, 吴长强, 林 杰, 冯振超, 何伟基\*, 陈 钱  
(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 激光雷达传统的成像方法需要经过长时间积分探测生成光子计数统计直方图的方式来减少背景噪声的影响, 获得目标场景的深度估计信息。为了快速准确地获取目标场景的 3D 图像, 提出基于光子计数激光雷达的三维距离图像时域去噪算法。该算法不需要生成光子计数统计直方图, 利用信号和噪声在时间轴上不同的分布特性, 结合了泊松过程统计规律。此算法提高了信号的探测概率, 能够在低信噪比的环境下将信号和噪声分离, 获得目标场景准确的 3D 图像。实验结果表明在低信噪比的条件下, 此算法获得深度图像的 RMSE 与传统基于最大似然估计成像方法相比成像精度至少提高了 3 倍。有利于激光雷达三维成像在高背景噪声环境下的使用, 拓宽了激光雷达的应用范围。

**关键词:** 光子计数激光雷达; 单光子探测器; 三维成像; 时域去噪

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182605.1175

## Time-domain denoising based on photon-counting LiDAR

LUO le, WU Chang-qiang, LIN Jie, FENG Zhen-chao, HE Wei-ji\*, CHEN Qian

(College of Electronic and Optical Engineering,  
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

\* Corresponding author, E-mail: hewj@mail.njust.edu.cn

**Abstract:** For decreasing the effect of background noise, the traditional imaging method of laser radar requires take long time in accumulation sampling and generating statistical histogram of photon counting to obtain the depth estimation of target. A 3D time-domain denoising algorithm based on photon-counting laser radar was proposed in this paper. Combined with the Poisson statistical model, the method proposed did not need to generate photon counting statistic histogram but used the different distribution feature of signal and noise in the time-domain, which increased the detection probability of signal photons and separated the signal from the noise to recover an accurate depth image of scene in the environment of low signal-to-noise rate. Experimental results demonstrate that the method increases the imaging accuracy by 3-fold at least comparing to the traditional maximum likelihood depth estimation. The method is conducive to the use of laser radar 3D imaging in high background noise environment and could broaden the application range of Lidar.

**Key words:** photon-counting laser radar; single-photon detector; 3D imaging; time domain denoising

收稿日期: 2017-09-30; 修订日期: 2017-11-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61271332); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 30920140112012); 高维信息、智能感知与系统教育部重点实验室创新基金项目 (No. JYB201509)

## 1 引言

光子计数三维成像激光雷达采用 Gm-APD (Geiger-mode Avalanche Photo Diode) 来探测目标回波信号, 获取相互独立的多个光子飞行时间。传统的成像方法通过发射多个激光脉冲积分探测并生成光子飞行时间统计直方图来提取目标的深度和反射率等信息, 重构出目标深度图像。借助单光子探测器单光子敏感和皮秒级时间响应等特性, 激光雷达三维成像系统能够实现极弱回波信号的探测, 从而获取远距离、高精度的目标深度图像。但是, 当背景噪声较强、目标反射率较低时, 目标回波信号受背景噪声干扰严重, 导致光子飞行时间统计直方图无法准确反映光子飞行时间的统计特征。此时, 如果直接采用传统的光子飞行时间判定方法将产生较大的误差。所以必须对光子计数三维成像激光雷达的输出响应进行去噪处理, 降低其虚警率, 从而提高目标深度图像的准确度。

为了去除噪声对光子计数激光雷达三维成像的干扰, 已发展了许多种基于光子计数激光雷达系统的去噪方法。Ahmed Kirmani 和 Dheera Venkatraman 等根据像素点的空间相关性和计算成像方法, 仅仅使用第一个探测到的回波光子的信息就获得了目标清晰的深度图像和反射率图像<sup>[1-3]</sup>。然而在目标的边缘, 第一个探测到的光子很有可能是由噪声引起的, 只使用第一个探测到的光子来重构目标的深度图像和反射率图像容易造成较大的误差。HongJin Kong 等提出了一种使用两个 Gm-APD 的新型激光雷达三维成像系统<sup>[4]</sup>。该系统使用两个探测器对目标反射的回波信号进行探测, 并将两个探测器的信号通过与逻辑滤除噪声, 从而降低了虚警率。但是双探测器的结构使得目标回波的能量降低了一半, 造成回波信号的探测概率下降, 同时多个探测器时间抖动带来的误差也会增大。张子静等将 Gm-APD 阵列划分为几个基本单元并设定合适的阈值来减少由噪声引起的虚警率<sup>[5]</sup>。但是, APD 阵列高暗计数率的问题将引入较大的成像误差而且增加了系统的复杂度。

为了快速、准确地获得目标的深度信息, 本文提出了一种基于光子之间的飞行时间相关性的时

域去噪方法。时间轴上由目标信号回波产生的探测器响应出现在回波脉冲持续时间内, 且主要集中在回波半波宽范围。而由噪声引起的探测器响应在时间轴上任何一个时间点都有可能出现且随机分布。本文提出的时域去噪算法利用这个特点, 能够在时间轴上分辨出探测器信号响应和噪声响应, 降低背景噪声产生的虚警率, 获得目标准确的深度信息。

## 2 概率模型分析

传统的最大似然深度估计算法通过对探测目标多次发射激光脉冲, 并经过长时间的积分生成光子计数统计直方图的形式来降低背景噪声的影响并获得目标深度估计值。但是, 当背景噪声较强时, 光子计数统计直方图并不能准确的反应光子分布的统计信息。同时, 系统需要较长的探测时间来生成光子计数统计直方图也限制了激光雷达三维成像系统在快速成像场合下的应用。

### 2.1 算法过程

在改进传统成像模型的基础上, 本文提出了一种能够有效滤除背景噪声获得深度估计的方法。该方法不需要生成光子计数统计直方图这一耗时的过程, 能够滤除由噪声引起的探测器响应。

定义时间轴上像素点  $(i, j)$  上获得的探测器响应飞行时间集合为  $\{t_{(i,j)}^m\}_{m=1}^M$ , 其中  $M$  为该像素点上获得的总响应数。本文提出的算法以时间轴上相邻的  $n$  个响应为判断的最小单元, 定义为时域  $n$ -邻域。由背景噪声引起的探测器响应在时间轴上随机分布; 激光回波信号引起的探测器响应由于受发射激光脉冲的调制作用, 在时间轴上分布比较集中且主要集中在激光脉宽  $T_p$  时间范围内。因此, 本文提出的算法首先计算最小单元(时域  $n$ -邻域)内探测器响应的的时间差并判断是否满足在  $T_p$  范围内, 即:

$$\sum_{l=1}^n |t_{(i,j)}^l - t_{(i,j)}^{l+1}| \leq (n-1) T_p. \quad (1)$$

如果不满足式(1), 则进行该像素点下一个最小单元的判断。如果满足式(1), 则判定该最小单元内的响应都是信号响应, 定义该最小单元为信号光子单元。计算信号光子单元内响应的平均飞行时间并作为该像素点的深度估计值:

$$T(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n t_{(i,j)}^l. \quad (2)$$

当获得该像素点深度估计值后转移到下一个像素点进行同样的判断过程。最终获得所有像素点的信号光子单元平均飞行时间集合,不需要生成光子计数统计直方图就能重构出目标场景的深度图像:

$$Z(i, j) = (c/2) T(i, j). \quad (3)$$

### 2.2 算法的探测概率和虚警概率

为了分析方便,将由目标回波信号引起的一次探测器响应定义为信号响应,由噪声引起的一次探测器响应定义为噪声响应。假设目标回波信号在第  $k$  个时间区间被探测到,  $B$  为距离门内噪声响应计数速率。假设在探测过程中噪声计数速率保持不变,  $N = BT_{\text{gate}}$ ,  $N$  为距离门  $T_{\text{gate}}$  内的噪声响应数,假设  $b$  为距离门内的时间单元数,  $n' = N/b$  为每个时间单元内分布的噪声响应数,  $S$  为距离门内信号响应数。在距离门内,信号响应探测概率  $P_d$  为<sup>[6]</sup>:

$$P_d = \exp(-(k-1)n') \times \{1 - \exp(-S - n')\}. \quad (4)$$

噪声响应探测概率  $P_f$ ,即虚警概率为:

$$P_f = 1 - P_d - \exp(-S - N). \quad (5)$$

定义时间轴上最小信号单元的探测概率为  $P_w$ ,激光脉冲的脉宽为  $T_p$ 。在多脉冲探测的条件下,第  $j$  个时间区间探测器有响应的概率为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} P_{j < k} &= \exp[-(j-1)BT_p][1 - \exp(-BT_p)], & 1 \leq j < k \\ P_{j > k} &= \exp[-(j-1)BT_p - S][1 - \exp(-BT_p)], & j > k \\ P_{j = k} &= \exp[-(k-1)BT_p][1 - \exp(-S - BT_p)], & j = k. \end{aligned} \quad (6)$$

时间轴上每个光子响应都是一个独立的泊松过程,因此根据光子响应出现在不同时间单元的情况,  $P_w$  可计算为:

$$P_w = \sum_{j=1}^{k-1} \prod_{l=1}^n P_{j < k}^l + \prod_{l=1}^n P_{j = k}^l + \sum_{j=k+1}^b \prod_{l=1}^n P_{j > k}^l. \quad (7)$$

信号光子响应的飞行时间服从二项分布,即:

$$\{t_{(i,j)}^l\}_{l=1}^n \sim B(n, P_d(i, j)). \quad (8)$$

因此,可以推导出本文算法的探测概率和虚警概率为:

$$P_{d(i,j)}^{\text{our}} (t_{(i,j)}^l \text{ are all signal photon} \mid P_w(i, j)) = \frac{\prod_{l=1}^n P_d(i, j)}{P_w(i, j)}, \quad (9)$$

$$P_{f(i,j)}^{\text{our}} (t_{(i,j)}^l \text{ at least one is noise photon} \mid P_w(i, j)) = \frac{\sum_{l=1}^n \binom{l}{n} P_d(i, j)^{n-l} P_f(i, j)^l}{P_w(i, j)}. \quad (10)$$

### 3 实验设置

实验所使用的三维成像激光雷达系统如图 1 所示。该系统使用了振镜扫描、收发共路的光学结构。激光器采用 PicoQuant 公司的半导体脉冲激光器,型号为 PDL800-B,波长为 830 nm,脉冲周期  $T_f = 400$  ns,脉宽  $T_p = 200$  ps。单光子探测器采用 PerkinElmer 公司的 Gm-APD,其死时间为 50 ps,暗计数小于 100/cps (counts per second)。光子计数模块采用 PicoHarp 300,具有最高 4 ps 极限时间分辨率。系统详细描述可以参考文献[8]。实验目标场景与激光雷达系统相距 20 m。目标场景中,两个物体相距 10 cm。实验获取目标场景 3D 图像的大小为  $300 \times 300$  pixel。为了客观衡量成像效果,本文采用均方根误差 RMSE(Root Mean Square Error)作为深度估计值  $r'$  与目标真实距离值  $r$  之间误差的评价标准,定义为:

$$\text{RMSE}(r, r') = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \sum (r - r')^2}, \quad n = 300. \quad (11)$$

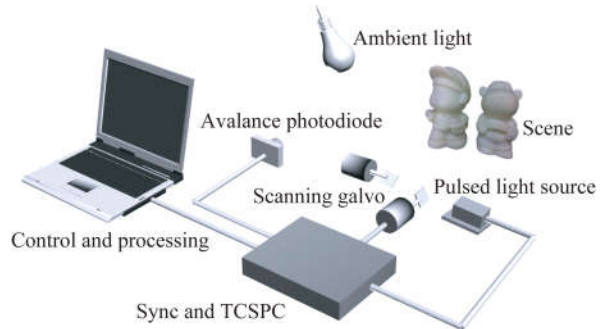


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

## 4 实验结果

在不同的噪声环境的条件下,定量对比传统的基于最大似然估计算法的成像方法和本文方法的成像性能。实验背景噪声的条件为  $SBR=1$  和  $SBR=10$ <sup>[18]</sup>。实验选取时域 3-邻域为最小单元,即  $n=3$ ,对目标场景一进行探测获得的实验结果如图 2 所示。

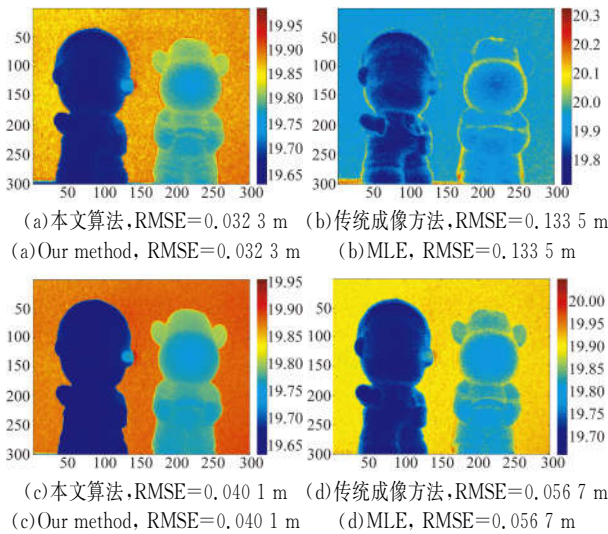
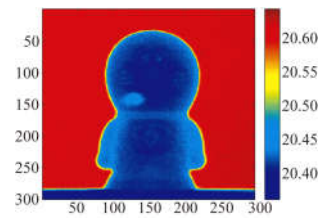


图 2 目标场景一实验结果

Fig. 2 Experimental results of scene 1

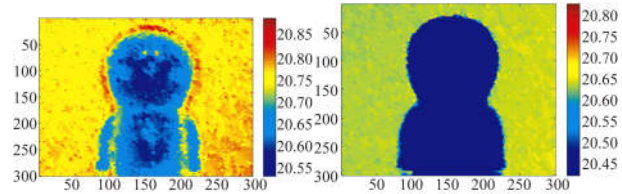
在低信噪比的条件下,受背景噪声的影响,使用传统的深度估计方法无法清晰地分辨两个目标物体之间的距离差别,如图 2(b)所示。传统的成像方法获得深度成像的 RMSE 为 0.133 5 m,而本文提出的成像方法将深度成像的 RMSE 降低到 0.032 3 m,即成像精度提高了 4.1 倍。因此,受高背景噪声的影响传统成像方法往往无法准确估计目标的深度信息,而本文提出的算法能够去除噪声的影响分辨出目标物体之间的距离差别。

为了验证本文算法的稳定性,对目标场景二进行实验,实验结果如图 3 所示。图 3(a)为目标场景真实的深度图,图 3(b)为使用传统的最大似然估计算法处理后的实验结果,图 3(c)为使用本文提出方法处理后的实验结果。从图 3 可以看出,使用传统的最大似然估计算法获得深度估计的 RMSE 为 0.198 7 m,而使用本文提出的算法获得的深度估计的 RMSE 为 0.059 1 m,即成像误差降低了 3.4 倍。



(a) 目标场景真实深度图

(a) Ground truth



(b) 传统算法, RMSE=0.198 7 m (c) 本文算法, RMSE=0.059 1 m

(b) MLE, RMSE=0.198 7 m (c) Our method, RMSE=0.059 1 m

图 3 目标场景二的实验结果

Fig. 3 Experimental results of scene 2

为了验证本文算法对目标信号探测概率的改善作用,对距离为 20 m 目标上的一固定点发射 100 个激光脉冲进行探测。光子单元大小  $n$  设为 3,在  $SBR=1$  和  $SBR=10$  两种环境下实验,实验结果如表 1 所示。从表 1 可以明显地看出本文提出的方法有效的提高了信号的探测概率且在低信噪比的条件下改善效果更明显。

表 1 本文方法对信号探测概率的改善效果

Tab. 1 Improvement of signal detection probability

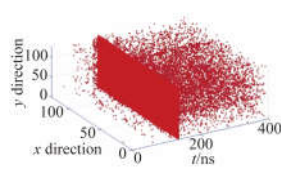
(%)

	SBR=1		SBR=10	
	MLE	Our method	MLE	Our method
$n=2$	57	93	85	96
$n=3$	58	94	82	99
$n=4$	57	97	86	99

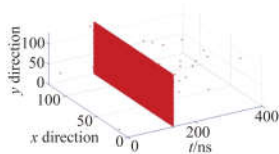
光子单元大小  $n$  的选取对算法影响的实验结果如图 4 和表 2 所示,图 4(c)和(d)、(e)和(f)、(g)和(h)分别对应于光子单元大小  $n$  为 2,3 和 4 时的实验结果(右边列为左边对应实验结果的细节图像)。从实验结果可以看出,随着光子单元大小选取得越大,本文算法获得深度图像的 RMSE 也越好,但成像时间也会随之增加。



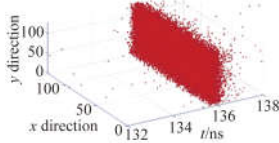
(a) 实验目标场景  
(a) Experimental scene



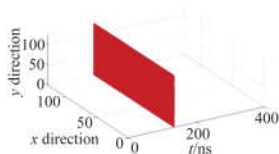
(b) 原始距离数据  
(b) Raw data



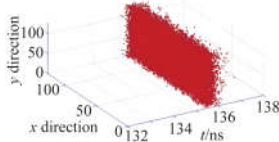
(c) 光子单元大小  $n$  为 2 时获取的目标 3D 深度图像  
(c) Depth image obtained at the photon unit size  $n$  of 2



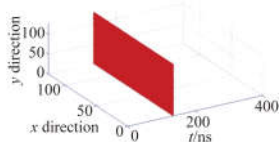
(d) 图(c)对应的细节图像  
(d) Detailed images respectively corresponding to (c)



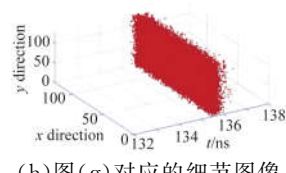
(e) 光子单元大小  $n$  为 3 时获取的目标 3D 深度图像  
(e) Depth image obtained at the photon unit size  $n$  of 3



(f) 图(e)对应的细节图像  
(f) Detailed images respectively corresponding to (e)



(g) 光子单元大小  $n$  为 4 时获取的目标 3D 深度图像  
(g) Depth image obtained at the photon unit size  $n$  of 4



(h) 图(g)对应的细节图像  
(h) Detailed images respectively corresponding to (g)

图 4 光子单元大小  $n$  对算法的影响

Fig. 4 Effect of photon unit size  $n$

表 2 光子单元大小  $n$  和背景噪声  $B$  的影响

Tab. 2 Effect of the photon unit size and background noise  $B$

	SBR=1, RMSE/m	SBR=10, RMSE/m
$n=2$	0.347 4	0.038 1
$n=3$	0.028 5	0.025 5
$n=4$	0.023 2	0.021 9

## 5 结 论

探测背景噪声较强的目标场景时,回波信号容易被背景噪声所淹没,使用传统的算法获得的目标深度信息存在较大的误差。为了准确获得目标深度信息,需要对系统探测到的信号进行去噪处理,降低系统的虚警率。本文提出了一种基于光子飞行时间相关性的时域去噪算法。本文算法利用噪声响应和信号响应在时间轴上不同分布特点,结合光子飞行时间相关性区分出噪声响应和信号响应。经理论分析和实验表明,在信噪比较低的条件下,算法能够将噪声和信号区分开并降低探测器的虚警率,有效的滤除噪声减小成像误差。与基于最大似然估计算法获得的深度图像相比,使用本文算法获得的深度图像的成像精度至少提高了 3 倍。本文算法有利于在背景噪声较强的环境下(如:白天日光下)对目标距离信息的探测,扩大了激光雷达三维成像系统的应用。但是,本文算法仍存在以下一些不足:一是不能清晰重建出目标物体上的深度细节特征;二是不适用于多距离特征重叠的回波信号探测。

## 参考文献:

[1] KIRMANIA, VENKATRAMAN D, SHIN D, et al.. First-photon imaging [J]. *Science*, 2014, 343 (6166): 58-61.

[2] SHIND, KIRMANI A, COLACO A, et al.. Parametric Poisson process imaging [C]. *Proceedings of 2013 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*, IEEE, 2013: 1053-1056.

[3] KIRMANIA, COLAÇO A, SHIN D, et al.. Spa-

- tio-temporal regularization for range imaging with high photon efficiency [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8858: 88581F.
- [4] KONG H J, KIM T H, JO S E, *et al.*. Smart three-dimensional imaging LADAR using two Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19323-19329.
- [5] ZHANG Z J, 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.
- [6] FOUCHÉ G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(27): 5388-5398.
- [7] HENRIKSSON M. Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(24): 5140-5147.
- [8] 司马博羽. 光子计数激光三维成像系统设计和实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.  
SIMA B Y. *Photon-counting laser radar 3d imaging system design and Implementation* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] SNYDER L. *Random Point Processes* [M]. New York, NY, USA: Wiley, 1975.
- [10] MCCARTHY A, REN X M, FRERER A D, *et al.*. Kilometer-range depth imaging at 1550 nm wavelength using an InGaAs/InP single-photon avalanche diode detector [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22098-22113.
- [11] LIANG Y, HUANG J H, REN M, *et al.*. 1550-nm time-of-flight ranging system employing laser with multiple repetition rates for reducing the range ambiguity [J]. *Optics express*, 2014, 22(4): 4662-4670.
- [12] ZHOU H, HE Y H, YOU L X, *et al.*. Few-photon imaging at 1550 nm using a low-timing-jitter superconducting nanowire single-photon detector [J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14603-14611.
- [13] MASSAJ S, BULLER G S, WALKER A C, *et al.*. Time-of-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(31): 7298-7304.
- [14] SCHWARZB. LIDAR: Mapping the world in 3D [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 429-430.
- [15] STOKER J, HARDING D, PARRISH J. The need for a national LIDAR dataset: photogrammetric engineering and remote sensing [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2008, 74(9): 1066-1068.
- [16] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [17] UMASUTHAN M, WALLACE A M, MASSA J S, *et al.*. Processing time-correlated single photon counting data to acquire range images [J]. *IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Process*, 1998, 145(4): 237-243.
- [18] SHIND, KIRMANI A, GOYAL V K, *et al.*. Photon-efficient computational 3-D and reflectivity imaging with single-photon detectors [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2015, 1(2): 112-125.

## 作者简介:



骆乐(1986—),男,江苏宿迁人,博士研究生,主要从事激光雷达三维成像、微光成像器件的研究。E-mail: wslla@126.com

## 通讯作者:



何伟基(1982—),男,广东韶关人,博士,副研究员,2004年、2010年于南京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电探测与光电成像的研究。E-mail: hewj@mail.njust.edu.cn